

**Российская академия наук
Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН
Научный совет по машиностроению РАН
Российский национальный комитет по теории машин и механизмов
Межведомственный научный совет по трибологии**



НАУЧНЫЕ ТРУДЫ

**VII Международной научной конференции
«Фундаментальные исследования и
инновационные технологии в
машиностроении»**

**Москва
2021**

УДК 621.9
ББК 34.5

Редакционная коллегия:

академик Ганиев Р.Ф., д.т.н., проф. Глазунов В.А., д.т.н., проф. Албагачиев А.Ю., д.т.н., проф. Романов А.Н., к.ф.-м.н. Хрущов М.М.

Издание трудов конференции осуществлено при поддержке ООО «Сайнтифик», г. Санкт-Петербург.

Научные труды VII Международной научной конференции “Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении”. – М.: ИМАШ РАН. – 2021. – 274 с.

В сборник включены статьи, написанные по материалам докладов, представленных на VII Международной научной конференции “Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении”, проходившей в онлайн формате с 14 по 16 декабря 2021 г. в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. На конференции были представлены результаты работ по следующим пяти научным направлениям:

1. Робототехника и автоматизация технологических процессов.
2. Инновационные, цифровые и аддитивные технологии в машиностроении.
3. Трибология, триботехнологии и сварка трением.
4. Перспективные конструкционные и трибологические материалы, наноматериалы и покрытия.
5. Проблемы прочности и надежности в инновационном машиностроении.

Организаторы конференции – Министерство науки и высшего образования Российской Федерации; Российская академия наук; Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН; Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН; Научный совет по машиностроению РАН, Российский национальный комитет по теории машин и механизмов; Межведомственный научный совет по трибологии; Российский союз научных и инженерных объединений (обществ); Ассоциация технологов–машиностроителей; Ассоциация инженеров–трибологов России.

Материалы сборника подготовлены к изданию оргкомитетом конференции на основе оригиналов авторских рукописей. Ответственность за достоверность сведений и хранение государственной или корпоративной тайны несут авторы публикаций.

ISBN 978-5-904282-13-4

ВЛИЯНИЕ МУНТ-ГИБРИДНЫХ СТРУКТУР НА ЖАРОПРОЧНОСТЬ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА

А.В. Аборкин, Д.М. Бабин, А.И. Залеснов, Д.В. Бокарёв

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича
Столетовых, Владимир, Россия; aborkin@vlsu.ru

В работе представлены данные о жаропрочности алюмоматричного композиционного материала, упрочненного МУНТ-гибридными структурами. Показан значительный вклад армирования МУНТ-гибридными структурами в рост жаропрочности композиционного материала.

Ключевые слова: МУНТ-гибридные структуры, композиционный материал, жаропрочность

Производство алюмоматричных композитов является эффективным способом получения конструкционных материалов, обеспечивающим возможность управления свойствами композита за счет комбинирования алюминиевых сплавов, типа, размера и формы упрочняющих частиц. К наиболее важным для практики свойствам алюмоматричных композитов следует отнести высокую удельную прочность (отношение прочности к плотности) и коррозионную стойкость, которые делают эти материалы востребованными в автомобильной [1], авиакосмической [2] и судостроительной промышленности [3].

Одним из наиболее перспективных видов упрочняющих наночастиц являются углеродные нанотрубки (УНТ) [4]. Во-первых, это обусловлено их уникальными физико-механическими свойствами. Так, например, модуль Юнга УНТ, измеренный с применением различных экспериментальных техник, в зависимости от хиральности, количества стенок, диаметра и дефектности структуры может достигать от ~1 до 4 ТПа [5]–[8], прочность при осевом растяжении 63–110 ГПа [7][9]. Во-вторых, связано с их низкой плотностью 1.1–1.8 г/см³ [10][11], которая значительно ниже плотности керамических частиц и несколько ниже плотности алюминиевых сплавов и поэтому не ведет к росту плотности композита, а, следовательно, и снижению весовой эффективности при больших концентрациях наполнителя.

Одна из ключевых проблем использования УНТ в качестве упрочняющих частиц для алюмоматричных композитов связана со слабой межфазной связью на границе раздела Al-УНТ, которая не позволяет реализовать механизм передачи нагрузки с матричного материала на упрочняющие частицы, имеющие высокую несущую способность. Поэтому разрушение композитных материалов происходит при нагрузках ниже теоретически ожидаемых.

Вариантом решением данной проблемы является модификация поверхности УНТ за счет формирования на ней островковых или сплошных покрытий, которые выступают в качестве промежуточной фазы между алюминиевой матрицей и УНТ, улучшая их межфазную связь. Такие подходы, например, рассмотрены в статьях [10–12]. Однако, важным моментом является отсутствие информации о жаро-

прочности алюмоматричных композитов, упрочненных МУНТ-гибридными структурами, которые, учитывая барьерный эффект керамического слоя, несомненно должны иметь высокий уровень жаропрочности.

Цель работы является изучение влияния МУНТ-гибридных структур на жаропрочность алюминиевого сплава.

Исходный матричный материал был в виде гранул из алюминиевого сплава АМг2 размером 1–2 мм. В качестве упрочняющих добавок использовали многостенные углеродные нанотрубки, покрытые слоем карбида титана [13]. Гранулы алюминиевого сплава АМг2 с 5 вес. % упрочняющих добавок смешивали с помощью высокоэнергетического шарового размола с использованием планетарной шаровой размольной машины (PULVERISETTE 6, Fritsch, Germany). Высокоэнергетический шаровой размол порошковой смеси осуществляли в 250 мл стакане из нержавеющей стали. Для этого использовали размольные шарики из закаленной стали 100Cr6 диаметром 8 мм с соотношением массы шарика к порошку 15: 1. Скорость вращения составляла 600 об/мин, а время размола 6 часов.

Полученные порошки подвергали одноосному холодному прессованию на гидравлическом прессе для получения брикетов диаметром 16 мм. Брикеты подвергали горячему прессованию на том же прессе в специальной стальной форме нагретой до 450 °С при давлении 400 МПа для получения компактов диаметром 17 мм и высотой 12 мм. Далее с помощью электроэрозионной резки на станке Mitsubishi BA8 (Mitsubishi) изготавливали цилиндрические образцы диаметром 6 мм и высотой 11 мм. Полученные образцы испытывали на сжатие в высокотемпературной ячейке. Температура испытаний 400–500°С.

Анализ СЭМ-изображений композиционных порошков показывает, что частицы порошка имеют округлую форму с развитой поверхностью. Средний размер частиц порошка составляет ~50 мкм. На поверхности частиц порошка фиксировали наполнитель. Длина частиц наполнителя была ~600 – 1000 нм. При этом было отмечено налипание матричного алюминиевого сплава на поверхность МУНТ-гибридных структур. Это вызвано улучше-

нием адгезии наполнителя к матричному алюминию сплаву за счет наличия граничного слоя в виде ex-situ TiC. Улучшение адгезии между матричным материалом и наполнителем должно благоприятно сказаться на свойствах Al/УНТ композита.

Также проведен анализ изображений поверхности объемных образцов. Объемные образцы демонстрируют плотную микроструктуру без видимых дефектов на границе частиц порошка, что характерно при отсутствии агломерации упрочняющих частиц. Распределение темной фазы очень равномерное. Это также свидетельствует о хорошей дисперсии упрочняющих частиц и отсутствии значительной кластеризации наполнителя.

На рис. 1 представлены результаты испытаний на сжатие при различной температуре полученных композитов. Также приведены данные по матричному материалу, обработанному по тому же маршруту.

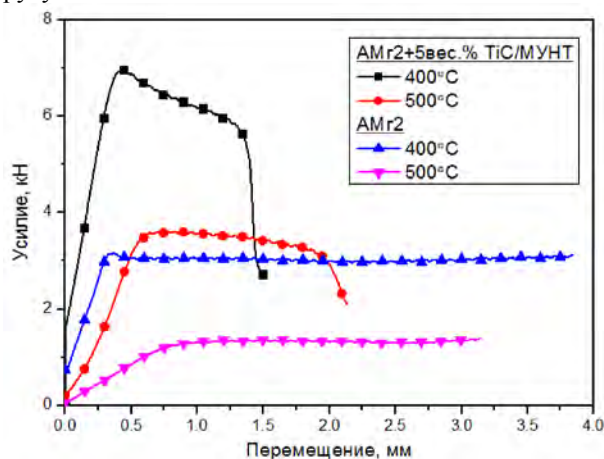


Рис. 1. Результаты испытаний на сжатие при различной температуре

Сравнительный анализ результатов показывает значительное влияние МУНТ-гибридных структур на жаропрочность алюминиевого сплава. Образцы из AМr2 пластично деформировались при обеих температурах. На испытании при температуре 400 °С усилие, при котором образец начал деформироваться без увеличения прикладываемого усилия составило ~3 кН, при температуре в 500 °С образец выдержал ~1,2 кН. Добавление гибридных наноструктур на основе углеродных нанотрубок увеличило выдерживаемое усилие до разрушения на испытании при 400 °С практически вдвое до 7 кН и вызвало деформацию на 1,5 мм, а на испытании при 500 °С образец выдержал в 2,5 раза больше образца из матричного материала (~3,5 кН). При увеличении температуры испытания с 400 °С до 500 °С композитный материал деформировался на 25% выше. Для матричного материала упругая реакция на начальном отрезке испытания наблюдается только при сжатии при 400 °С. Наблюдаемый эффект повышения жаропрочности может быть объяснен тем, что наличие на границах зерен УНТ мешает рекристаллизационному росту зерна, снижающему прочность, а карбид титана

экранирует их от окисления. Однако, при этом, как свидетельствуют результаты испытаний, из-за более мелкой структуры зерна, страдает пластичность.

Работа выполнена при поддержке РНФ (проект №18-79-10227).

1. S. Liu, Y. Wang, T. Muthuramalingam, and G. Anbuechzhayan, "Effect of B4C and MOS2 reinforcement on micro structure and wear properties of aluminum hybrid composite for automotive applications," *Compos. Part B. Eng.*, 2019, vol. 176, p. 107329, doi: 10.1016/j.compositesb.2019.107329.
2. D. K. Koli, G. Agnihotri, and R. Purohit, "Advanced Aluminium Matrix Composites: The Critical Need of Automotive and Aerospace Engineering Fields," in *Materials Today: Proceedings*, 2015, vol. 2, no. 4–5, pp. 3032–3041, doi: 10.1016/j.matpr.2015.07.290.
3. T. M. Harish et al., "Development of aluminium 5056/SiC/bagasse ash hybrid composites using stir casting method," in *Materials Today: Proceedings*, 2019, vol. 27, pp. 2635–2639, doi: 10.1016/j.matpr.2019.11.081.
4. K. T. Kashyap and R. G. Patil, "On Young's modulus of multi-walled carbon nanotubes," *Bull. Mater. Sci.*, 2008, vol. 31, no. 2, pp. 185–187. doi: 10.1007/s12034-008-0032-2.
5. E. W. Wong, P. E. Sheehan, and C. M. Lieber, "Nanobeam mechanics: Elasticity, strength, and toughness of nanorods and nanotubes," *Science* (80-), 1997, vol. 277, no. 5334, pp. 1971–1975, doi: 10.1126/science.277.5334.1971.
6. M. F. Yu, O. Lourie, M. J. Dyer, K. Moloni, T. F. Kelly, and R. S. Ruoff, "Strength and breaking mechanism of multi-walled carbon nanotubes under tensile load," *Science* (80-), 2000, vol. 287, no. 5453, pp. 637–640. doi: 10.1126/science.287.5453.637.
7. O. Lourie and H. D. Wagner, "Evaluation of Young's modulus of carbon nanotubes by micro-Raman spectroscopy," *Journal of Materials Research*, 1998, vol. 13, no. 9, pp. 2418–2422, doi: 10.1557/JMR.1998.0336.
8. B. Peng et al., "Measurements of near-ultimate strength for multiwalled carbon nanotubes and irradiation-induced cross-linking improvements," *Nat. Nanotechnol.*, 2008, vol. 3, no. 10, pp. 626–631. doi: 10.1038/nnano.2008.211.
9. S. H. Kim, G. W. Mulholland, and M. R. Zachariah, "Density measurement of size selected multiwalled carbon nanotubes by mobility-mass characterization," *Carbon*, 2009, vol. 47, no. 5, pp. 1297–1302. doi: 10.1016/j.carbon.2009.01.011.
10. D. F. Johnson, B. J. Craft, and S. M. Jaffe, "Adhered supported carbon nanotubes," 2001.
11. A. Aborkin, D. Babin, A. Zalesnov, E. Prusov, A. Ob'edkov, and M. Alymov, "Effect of ceramic coating on carbon nanotubes interaction with matrix material and mechanical properties of aluminum matrix nanocomposite," *Ceram. Int.*, 2020, vol. 46, no. 11, pp. 19256–19263, doi: 10.1016/j.ceramint.2020.04.264.
12. A. Aborkin et al., "Effect of Increasing the Strength of Aluminum Matrix Nanocomposites Reinforced with Micro-additions of Multiwalled Carbon Nanotubes Coated with TiC Nanoparticles," *Nanomaterials*, 2019, vol. 9, no. 11, p. 1596. doi: 10.3390/nano9111596.
13. A. V. Aborkin et al., "Thermal expansion of aluminum matrix composites reinforced by carbon nanotubes with in-situ and ex-situ designed interfaces ceramics layers," *J. Alloys Compd.*, 2021, vol. 872, p. 159593, doi: 10.1016/j.jallcom.2021.159593.
14. A. V. Aborkin, K. V. Kremlev, A. M. Obiedkov, B. S. Kaverin, N. M. Semenov, and G. S. Zabrodina, "Synthesis and characterization of new hybrid material based on MWCNTs decorated with titanium carbide nanocoatings with different morphology as reinforcing components of alloys," in *Journal of Physics: Conference Series*, Mar. 2019, vol. 1164, no. 1, p. 012020, doi: 10.1088/1742-6596/1164/1/012020.

СРАВНЕНИЕ СУХИХ И РАСТВОРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПОЛУЧЕНИЯ ПОРОШКОВЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА, АРМИРОВАННЫХ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОСТРУКТУРАМИ

А.В. Аборкин, К.С. Хорьков, Д.В. Бокарёв

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, Владимир, Россия; aborkin@vlsu.ru

Статья посвящена сравнительной оценке технологий получения порошковых нанокompозитов на основе сплава АМg2 с позиции их влияния на структуру матричного материала и армирующих наночастиц. Характеризация структуры порошковых нанокompозитов проводилась с помощью методов просвечивающей электронной микроскопии и спектроскопии КР.

Ключевые слова: спектроскопия комбинационного рассеяния, алюмоматричные композиты, углеродные нанотрубки, структурная целостность.

На данный момент композиты системы алюминий-УНТ создаются в основном комбинацией механического размолла с последующей консолидацией [1]. Однако в настоящее время уровень свойств композиционных материалов упрочненных углеродными нанотрубками остается значительно ниже теоретически ожидаемого. Одной из основных проблем, мешающих раскрытию потенциала УНТ в качестве армирующего наполнителя алюмоматричных композитов, наряду со слабой межфазной связью [2], является снижение структурной целостности нанотрубок при увеличении интенсивности и/или времени процесса получения порошковой смеси для повышения однородности распределения нанотрубок в матрице. Существует сильная зависимость изменения целостности структуры углеродных нанотрубок от режима получения порошковых нанокompозитов.

В ходе шарового размолла происходит интенсивное механическое воздействие на композитную смесь, что приводит к повреждению структуры нанотрубок, что уменьшает их эффективную длину, редуцируя эффект переноса нагрузки с матрицы на более прочные углеродные нанотрубки и инициирует химическую реакцию образования карбидных структур на дефектах стенок углеродных нанотрубок при последующем процессе консолидации [3].

Таким образом, использование в качестве наполнителя алюмоматричных композитов УНТ с минимальным количеством дефектов приводит к улучшению физико-механических свойств материала по сравнению с добавлением более дефектных УНТ [4]. Одним из путей достижения однородного распределения УНТ в алюминиевой матрице с сохранением целостности структуры нанотрубок является их предварительная обработка ультразвуком в жидкой среде с созданием тонкодисперсных систем. Гомогенное распределение частиц армирования в матрице с сохранением их высокой целостности должно положительно повлиять на эксплуатационную надежность консолидированных изделий.

Многостенные углеродные нанотрубки со средним диаметром в 70 нм были синтезированы методом МОСVD (химического осаждения ме-

талло-органических соединений) в Институте металлоорганической химии им. Г.А. Разуваева Российской академии наук (г. Нижний Новгород). В качестве прекурсоров использовались ферроцен и толуол. Нанотрубки в состоянии поставки по большей части объединены в кластеры за счет высоких Ван-дер-Ваальсовых взаимодействий. Внутренние стенки обладают более высокоупорядоченной структурой по сравнению с внешними. Более подробные детали процесса синтеза содержатся в статье [5].

Получение порошковых нанокompозитов, содержащих 0,1 вес.% нанотрубок происходило двумя разными технологическими маршрутами.

Первый заключался в механическом синтезе порошковых нанокompозитов путем измельчения гранул сплава АМg2 со средним размером в 1-2 мм с добавлением 0,1 вес.% МУНТ в планетарной шаровой мельнице FRITSCH PULVERISETTE 6 с использованием стакана и шаров из закаленной стали ШХ-15 при частоте вращения водила 600 мин⁻¹ на протяжении 6 часов с добавлением 1 вес.% стеариновой кислоты в качестве ПАВ. Соотношение массы измельчаемых компонентов и шаров составляло 1:5.

Получение порошкового нанокompозита по второй технологии происходило в три этапа. Первым являлось создание тонкодисперсной системы, содержащей УНТ, на основе пропанола с использованием поликарбоксилатного полимера «Макромер П13К» в качестве ПАВ с помощью ультразвукового диспергирования на установке И100-6/4 при мощности 1 кВт и рабочей частоте 22 кГц на протяжении 2 часов с остановками каждые 30 минут для защиты установки от перегрева. На втором этапе в полученную тонкодисперсную систему вводили порошок сплава АМg2, предварительно подвергнутого высокоэнергетическому размолу при аналогичных режимных параметрах, что и механосинтезированный композит. Полученная смесь смешивалась в планетарной мельнице с использованием керамического стакана из диоксида циркония и керамических размольных шаров (также из ZrO₂) при частоте вращения водила 300 мин⁻¹ на протяжении 3 часов. Завершающим этапом синтеза ПНК являлась его сушка

при 100°C на протяжении 6 ч.

Морфология частиц порошковых нанокомпозитов была исследована с помощью метода сканирующей электронной микроскопии на электронном микроскопе Zeiss Ultra 55. Изображения морфологии порошковых частиц представлены на рис. 1.

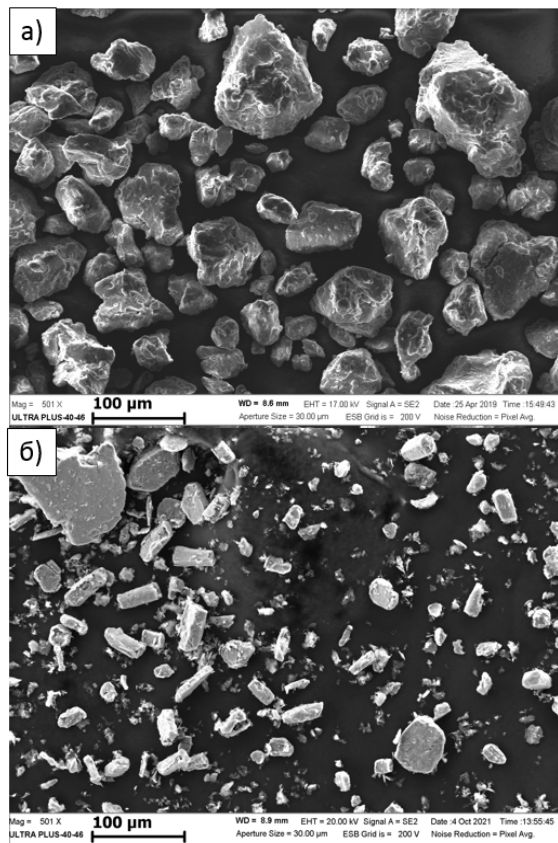


Рис. 1. СЭМ-изображения морфологии частиц порошковых нанокомпозитов, полученных а) высокэнергетическим шаровым размолом, б) низкэнергетическим шаровым размолом предварительно подвергнутых ультразвуковой обработке УНТ с порошком сплава АМг2

Для полученного высокэнергетическим шаровым размолом на протяжении 6 часов обработки порошка характерна неправильная округлая форма частиц и средний размер частиц ~50 мкм. Частиц наполнителя на поверхности алюминия визуально обнаружено не было, что может свидетельствовать о том, что они были заключены внутрь гранул в процессе механосинтеза.

При дальнейшей обработке матричного порошка низкэнергетическим шаровым размолом на протяжении 3 часов происходит дальнейшее снижение среднего размера частиц и изменение формы частиц на чешуйчатую округлую, что сопровождается увеличением площади поверхности алюминиевых частиц и способствует распределению нанотрубок на поверхности частиц алюминия, что должно обеспечивать улучшенный перенос нагрузки с матрицы на углеродные нанотрубки.

Для изучения структурной целостности УНТ исследовались их спектры комбинационного рассеяния. Исследование проводилось с использованием

комплекса NTEGRA Spectra. Было проведено не менее 5 измерений для каждого образца. Результаты измерений представлены на рис. 2.

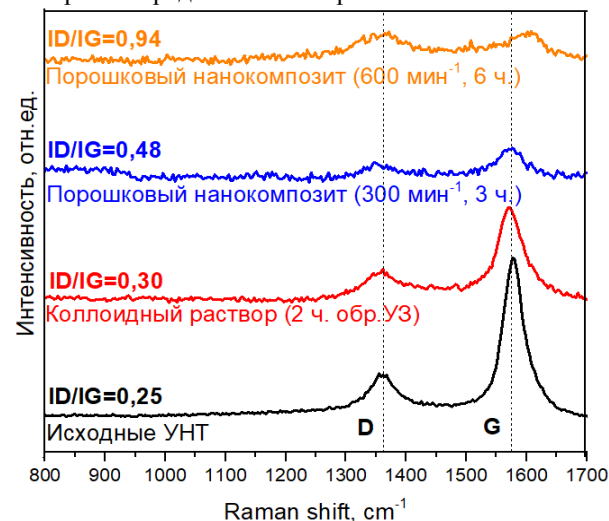


Рис. 2. Спектры КР углеродных нанотрубок при получении порошковых нанокомпозитов разными маршрутами

Результаты анализа спектров КР показали, что для механосинтезированного порошка соотношение пиков возросло с 0,25 до 0,9 более чем в 3 раза, что говорит о сильном повреждении нанотрубок во время получения порошкового нанокомпозита. Для композита, полученного по растворной технологии характерно в 2 раза меньшее соотношение пиков по сравнению с композитом, полученным по сухой технологии, что свидетельствует о большем сохранении целостности нанотрубок.

Работа выполнена в рамках программы Минобрнауки России «Содействие занятости выпускников 2020 года на научно-исследовательские позиции в образовательные организации высшего образования и научные организации».

1. M. Jagannatham, P. et al., "Tensile properties of carbon nanotubes reinforced aluminum matrix composites: A review" Carbon. 2020, V. 160, P. 14–44.
2. E. Neubauer et al., "Potential and challenges of metal-matrix-composites reinforced with carbon nanofibers and carbon nanotubes" Compos. Sci. Technol., 2010, V. 70(16), P. 2228–2236.
3. S. R. Bakshi et al., "An analysis of the factors affecting strengthening in carbon nanotube reinforced aluminum composites" Carbon. 2011, V. 49(2), P. 533–544.
4. M. T. Z. Hassan et al., "Effect of carbon nanotube damage on the mechanical properties of aluminium-carbon nanotube composites" J. Alloys Compd. 2014, V. 607, P. 215–222.
5. Obiedkov A M et al., "Macroscopic cylinders on the basis of radial-oriented multi-wall car-bon nanotubes" Lett. Mater., 2012, V.2 (3), P. 152-156.

ИССЛЕДОВАНИЕ АБРАЗИВНОГО ИЗНОСА ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ СТЕКЛОКОМПОЗИТНЫХ ТРУБ

А.Ю. Албагачиев¹, С.В. Иванов¹, Д.А. Мельников¹, В.А. Антошин²

¹Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; fast-trust@yandex.ru.

²Общество с ограниченной ответственностью «Новые Трубные Технологии», Москва, Россия; antoshin@ntt.su.

В работе исследовано влияние воздействия абразивного состава на внутреннюю поверхность стеклокомпозитных труб с внутренним слоем на основе трех различных типов полимерных матриц: ортофталевая полиэфирная, изофталевая полиэфирная, винилэфирная. Получение данных по абразивному износу стеклокомпозитных труб позволит прогнозировать срок службы трубопроводов с обеспечением максимальной эксплуатационной безопасностью и экономической эффективностью.

Введение

За последнее время материалы из стеклопластика, благодаря своим высоким механическим и эксплуатационным характеристикам и повышению экономической эффективности применения, все шире внедряются в строительную отрасль и успешно конкурируют с «классическими» материалами: сталь, чугун, железобетон, полиэтилен и др. В первую очередь изделия из стеклопластика находят применение в тех секторах строительной отрасли, где требуется сочетание высоких механических характеристик, химической и коррозионной стойкости, весовой эффективности, что комплексно влияет на увеличение срока безаварийной эксплуатации и значительно снижает стоимость владения сооружениями [1].

В частности, стеклопластик нашел применение как материал для изготовления труб при сооружении водопроводов, трубопроводов бытовой канализации, ливнестоков, промышленных и других водостоков, трубопроводов для транспортировки химических жидкостей и др.

Цель

Исследование влияния воздействия абразивного состава на внутреннюю поверхность стеклокомпозитных труб с внутренним слоем на основе трех различных типов полимерных матриц: ортофталевая полиэфирная, изофталевая полиэфирная, винилэфирная.

Получение данных по абразивному износу стеклокомпозитных труб позволит прогнозировать срок службы трубопроводов с обеспечением максимальной эксплуатационной безопасностью и экономической эффективностью.

Материалы и методы

В качестве образцов были изготовлены методом непрерывной намотки стеклокомпозитные трубы номинальным диаметром (DN) 400 мм, рабочим давлением (PN) 0,6 МПа, кольцевой жесткостью (SN) 5000 Па с внутренним слоем на основе:

- изофталевой полиэфирной смолы (Образец №1);
- ортофталевой полиэфирной смолы (Образец №2);
- винилэфирной смолы (Образец №3).

В процессе испытания внутреннюю поверхность образцов трубы подвергали воздействию аб-

разивной среды на аттестованном оборудовании с фиксацией толщины истирания с заданной периодичностью.

Методика испытания соответствовала ГОСТ Р 55877-2013 (метод Б).

Абразивная среда нормирована ГОСТ Р 55877 и представляла собой воду с гравием зернистостью F4 по ГОСТ Р 52381 и насыпной плотностью 1,65 г/см по ГОСТ 9758 (рис.1).



Рис. 1. Фотография абразивного материала, применявшегося для испытаний

Для испытаний был разработан и изготовлен испытательный стенд (рис. 2, 3).

Испытательный стенд состоит из неподвижной опорной рамы и подвижной платформы с креплениями для образцов стеклокомпозитных труб.

Испытательный стенд позволяет совершать колебания подвижной платформы на заданный угол с заданной скоростью с фиксацией количества циклов с помощью автоматического регистрирующего устройства (датчика).

Измерительное устройство обеспечивает измерение вертикальных координат внутренней поверхности образцов в контрольных точках относительно неизменяемой на протяжении всего времени испытания (т.е. после каждого разового испытания в серии разовых испытаний) измерительной базы. Равноотстоящие друг от друга контрольные точки располагаются вдоль продольной линии, находящейся в

нижней части (на 6 ч) внутренней поверхности образцов. Координаты контрольных точек определяются с точностью не менее $\pm 0,02$ мм. Измерительная база является частью испытательного стенда и устанавливается непосредственно на него [2,3].

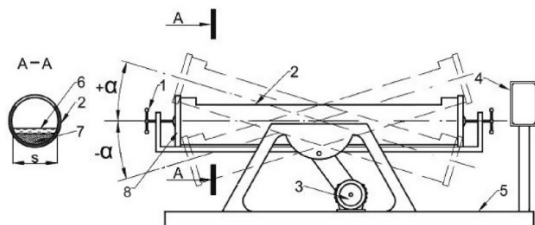


Рис. 2. Принципиальная схема испытательного стенда по ГОСТ Р 55877-2013 (метод Б). 1 – устройство фиксации торцевых пластин; 2 – образец для испытаний; 3 – привод; 4 – устройство управления; 5 – основание стенда; 6 – уровень воды; 7 – абразивный материал; 8 – торцевая пластина; s – ширина зеркала воды; $\pm\alpha$ – углы отклонения рамы.



Рис. 3. Фотография работающего испытательного стенда с установленными образцами.

Согласно ГОСТ Р 55877-2013, скорость качаний рамы испытательного стенда составляла 10 ± 2 испытательных циклов в минуту с углом наклона образцов $\pm 22,5^\circ$ относительно горизонтальной плоскости. Таким образом, за один испытательный цикл образцу придавалось угловое перемещение равное 90° .

Суммарное количество испытательных циклов в серии разовых испытаний должно составлять 200000. Количество испытательных циклов в каждом разовом испытании – 50000. После выполнения каждого разового испытания (при достижении 50000 испытательных циклов, количество которых измерялось счётчиком импульсов) из образцов удалялась абразивная смесь и измерялся износ в каждой контрольной точке (a_i). Помимо этого, визуально определялись и фиксировались признаки повреждения внутренней поверхности образцов.

Общая продолжительность выполнения испытаний, включая получение и обработку результатов каждого отдельного разового испытания составила 30 календарных дней. Чистое время работы испытательного стенда составило 334 часа.

Непрерывность работы испытательного стенда контролировалось системой IP видеонаблюдения и

дистанционного управления работой привода.

После проведения испытаний для каждого разового испытания (номера k) вычисляют среднеарифметическое значение износа по формуле:

$$a_{\text{средн},k} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n}, \quad (1)$$

где a_i – износ в каждой контрольной точке, мм;

n – количество контрольных точек.

Измерения проводили по 69 точкам в каждом образце с периодичностью 50000 циклов до достижения 200000 циклов. При этом в ГОСТ Р 55877-2013 указано, что 100000 испытательных циклов могут быть эквивалентными сроку эксплуатации труб в системах водоотведения при среднестатистических условиях эксплуатации, равному 50 годам.

Результаты и их обсуждение

В табл. 1 представлены значения среднеарифметического износа образцов труб после каждого единичного испытания, рассчитанные по формуле (1).

Таблица 1. Среднеарифметические значения износа по результатам испытаний.

Кол-во циклов, шт.	Абразивный износ, мм		
	Образец 1	Образец 2	Образец 3
50000	0,024	0,025	0,008
100000	0,073	0,066	0,023
150000	0,187	0,111	0,042
200000	0,355	0,216	0,065

По результатам испытаний установлено, что наибольшей устойчивостью к абразивному износу обладают стеклокомпозитные трубы на основе винилэфирной смолы.

На основании полученных результатов в соответствии с пунктом 9.2.3 ГОСТ Р 55877-2013 были рассчитаны коэффициенты безопасности ($F_{\text{БК}}$) стеклокомпозитных труб в зависимости от количества испытательных циклов по формуле:

$$F_{\text{БК}} = \frac{\delta_{\text{л}}}{a_{\text{средн},k}}, \quad (2)$$

где $a_{\text{средн},k}$ – среднеарифметическое значение износа для разового испытания номера k , мм;

$\delta_{\text{л}}$ – толщина лайнерного слоя стеклокомпозитной трубы, мм.

Результаты расчетов по формуле (2) при условии толщины лайнерного слоя 1,5 мм (минимальное требование к стеклокомпозитным трубам) представлены в табл. 2.

Таблица 2. Значения коэффициентов безопасности в зависимости от количества испытательных циклов.

Кол-во циклов, шт.	Коэффициент безопасности, $F_{\text{БК}}$		
	Образец 1	Образец 2	Образец 3
50000	62,50	60,00	187,50
100000	20,55	22,73	65,22
150000	8,02	13,51	35,71
200000	4,23	6,94	23,08

Для оценки количества испытательных циклов, необходимых для истирания лайнерного слоя (толщиной 1,5 мм для всех трех образцов), полученные зависимости износа от количества циклов были ап-

проксимированы на к полиномиальным функциям (в степени 2, величина достоверности аппроксимации R^2 составила не менее 0,99). Полученные в графическом виде зависимости представлены на рисунке 4.

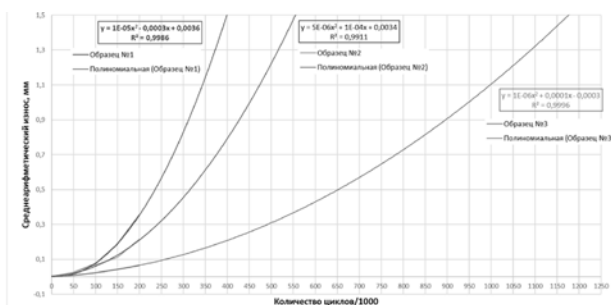


Рис. 4. Аппроксимированные зависимости износа внутренней поверхности труб от количества испытательных циклов

По экстраполяции полученных зависимостей было определено предполагаемое количество испытательных циклов, необходимых для разрушения лайнерного слоя каждого образца (при допущении об устойчивом характере разрушения лайнера). Результаты определения представлены в табл. 3.

Таблица 3. Количество испытательных циклов и пробег потока взвеси в испытываемых трубах до полного износа лайнерного слоя

№ образца	Количество испытательных циклов, шт	Пробег потока взвеси, км
1	402 000	804
2	537 000	1074
3	1 276 000	2552

Зная расчетную скорость течения воды на участке самотечного трубопровода, можно определить долговечность лайнерного слоя, выраженную через износостойкость. На рис. 5 представлена зависимость долговечности (стойкости к истиранию) лайнерного слоя испытываемых труб в зависимости от скорости потока абразивной смеси.

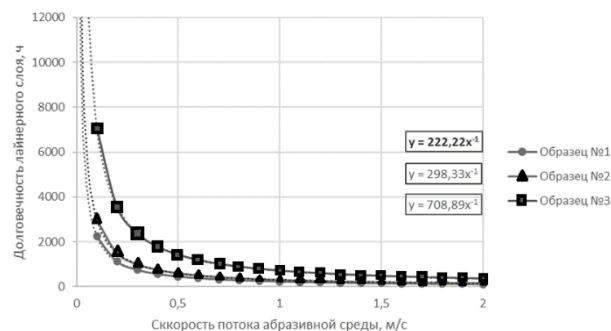


Рис. 5. Аппроксимированные зависимости износа внутренней поверхности труб от количества испытательных циклов

Полученные зависимости, выраженные через функции, представлены в табл. 4.

Таблица 4. Зависимость долговечности лайнерного слоя (А) от скорости потока абразивной среды (v_a).

№ образца	Количество испытательных циклов, шт	Пробег потока взвеси, км
1	804	$A(v_a) = 222,22v_a^{-1}$
2	1074	$A(v_a) = 298,33v_a^{-1}$
3	2552	$A(v_a) = 708,89v_a^{-1}$

Результаты испытаний показали, что требования по сопротивлению истиранию стеклокомпозитных труб выполнены и подтвержден срок службы более 50 лет.

Даже после 200000 циклов значение истирания не превышает толщины защитного внутреннего слоя в 1,5 мм. Однако стойкость труб с внутренним слоем на основе винилэфирной смолы (Образец №3) не менее чем в 2 раза превосходит по абразивной стойкости трубы с внутренним слоем из орто- или изофталевой полиэфирной смолы.

Таким образом, полученные результаты исследования абразивной стойкости стеклокомпозитных труб позволяют рассчитывать работоспособность трубопровода при заданных условиях, прогнозировать срок эксплуатации трубопроводов, а также проводить обоснованный выбор материала для изготовления трубопровода.

В дальнейшем авторы продолжают исследования в данной области с целью получить экспериментальные данные по абразивной стойкости иных материалов (полиэтилен, полипропилен, сталь, железобетон и др.), а также определению абразивного износа при воздействии потока жидкости под давлением.

1. Мельников Д.А., Иванов С.В., Антошин В.А. Стеклокомпозитные трубы и изделия из них: заданное сочетание эксплуатационных и технологических свойств // Наилучшие доступные технологии водоснабжения и водоотведения. – 2020. – № 6. – С. 22-23.
2. Албагачиев А. Ю. Патент на полезную модель. Российская Федерация, МПК G01N19/02 /Машина для измерения трибометрических параметров материалов. // А.Ю. Албагачиев., А.Г. Абакумкин., Ю.В. Баранов., В.Н. Хованский., Н.П. Хованская. Заявитель и патентообладатель: Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (RU) - 2011138337/28; заявл.20.09.201115919. опубл. 20.09.2011.
3. Албагачиев А. Ю. Развитие научных и технических исследований в области трибологии и триботехники. / Трение и износ / А. В. Чичинадзе., А.Ю. Албагачиев., В.Д. Кожемякина. – 2012. – Т. 33. – №4. – С. 423-426.

ТЕХНОЛОГИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ ГИДРОСТРУЙНОЙ ОБРАБОТКИ

А.Ю. Албагачиев, А.П. Кушнир

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; gurinmura@yandex.ru

Рассмотрена проблема обработки поверхностей методом гидроструйной обработки. Предложен метод динамической гидроструйной обработки на основе переменного давления, создаваемого на выходе системы.

Ключевые слова: гидроструйная обработка, очистка, технология, дилатансия, гидравлический удар, падение давления, гидравлическое сопротивление, напор, пескоструйная обработка, коррозия.

Антикоррозийная защита металла — главная проблема в решении вопроса обеспечения долговечности металлических конструкций. Под влиянием комплекса атмосферных воздействий и агрессивных сред металлические конструкции утрачивают первоначальный внешний вид и теряют свои прочностные качества. Поэтому вопрос антикоррозийной защиты металлоконструкций всегда стоит очень остро [1 - 4].

К одним из новых направлений в области гидроабразивной обработки относятся работы, проведенные в МГУПИ (РТУ МИРЭА) авторами статьи под руководством профессора А.И. Крашенинникова [5 - 7]. Разработанная в лаборатории гидроструйной обработки и противокоррозионной защиты металлов МГУПИ технология на основе дилатансных добавок не только замедляют процесс коррозии, но и создает на обработанных металлических поверхностях защитно-декоративное покрытие серебристого цвета [8, 9], рис. 1.



Рис. 1. Результат обработки по технология гидроабразивной обработки

Новая технология гидроабразивной обработки поверхности металла позволяет за один технологический прием проводить операции обезжиривания, струйной очистки от загрязнений, ингибирования от атмосферной коррозии, мойки и сушки. Эффект достигается за счет введения в движущийся с высокой скоростью поток энергоносителя (до 400 м/с) специального гидроабразивного состава, использующего эффект дилатансии [10-13]. На рис. 2 показано, что с некоторой скорости деформации суспензия начинает вести себя, как неньютоновская жидкость.

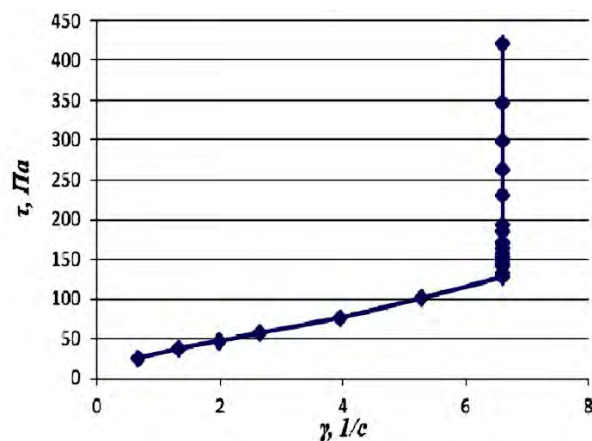


Рис. 2. Зависимость напряжений сдвига в суспензии от скорости деформации

В результате воздействия скоростного потока суспензии на поверхности образуется защитная нанопленка, обеспечивающая повышенную антикоррозионную стойкость металла, рис. 3.

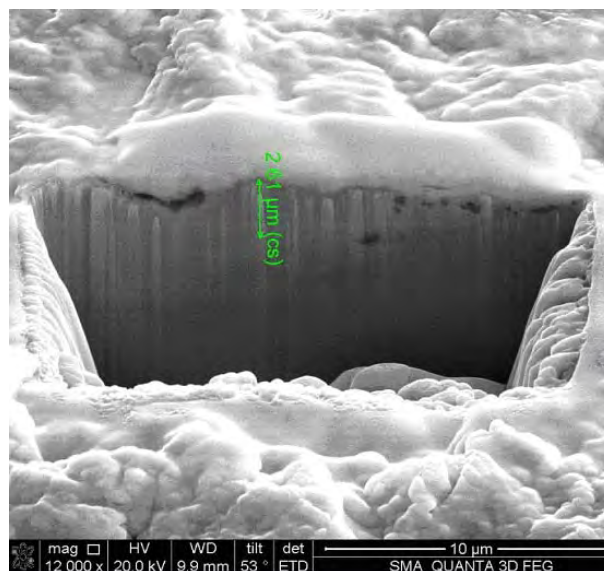


Рис. 3. Защитная нанопленка

На практике расстояние от источника давления до конца трубопровода (рукава) может быть довольно существенным. С учетом высоких скоростей течения суспензии при большой длине трубопровода потери давления могут быть очень велики.

Данный фактор существенно снижает эффективность обработки, так как значительная часть энергии давления переходит в потери, рис. 4.

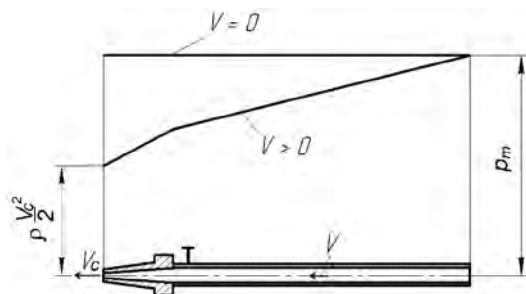


Рис. 4. Эшора давлений в трубопроводе

Потери давления в трубопроводе могут быть описаны уравнением Бернулли

$$\frac{\rho}{2} \left(V_c^2 + \zeta V^2 + \lambda \frac{l}{d} V^2 \right) = p_m, \quad (1)$$

где ρ - плотность суспензии; V - скорость течения суспензии в рукаве; ζ - коэффициент местных потерь сопла; V_c - скорость течения суспензии на выходе сопла; λ - коэффициент потерь по длине; l - длина рукава; d - внутренний диаметр рукава; p_m - давление в магистрали.

Как следует из уравнения (1), потери давления в рукаве пропорциональны квадрату скорости течения суспензии. За счет этих потерь скорость на выходе сопла и, соответственно, эффективность обработки резко снижается.

$$V_c = \sqrt{2 \frac{p_m}{\rho} - \zeta V^2 - \lambda \frac{l}{d} V^2} \quad (2)$$

Если перекрыть поток, то давление перед соплом вырастет в статике от величины p_c до значения p_m . Таким образом, скорость потока на выходе сопла может достигнуть значения

$$V_c = \sqrt{2 \frac{p_m}{\rho}} \quad (3)$$

До еще больших значений давление перед соплом может повыситься в динамическом режиме. Этот случай наступает при резком закрытии задвижки и называется гидравлическим ударом. Впервые данный процесс был описан теоретически Н.Е. Жуковским.

$$\Delta p = \rho \cdot c \cdot \Delta V \quad (4)$$

где Δp - повышение давления при гидроударе; c - скорость распространения ударной волны; ΔV - разность скоростей течения жидкости в трубопроводе до и после закрытия задвижки.

Данный процесс иллюстрируется рисунком 5, который показывает, что динамическое повышение давления Δp существенно превышает статическое повышение давления Δp_c .

С учетом того, что увеличение давления приводит к росту скорости струи суспензии, эффективность гидроструйной обработки может быть повышена.

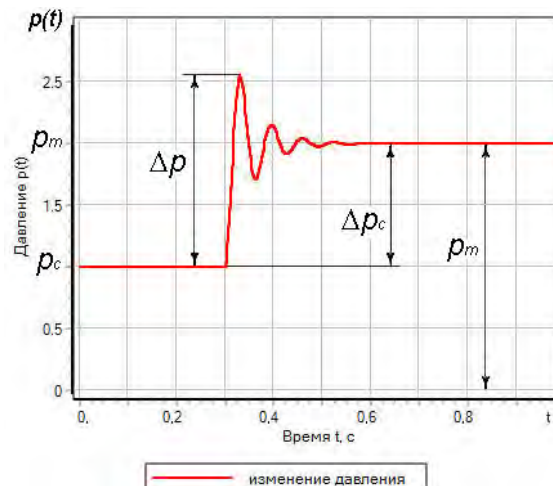


Рис. 5. Изменение давления перед соплом в динамическом режиме

Выводы.

1. Существенная часть давления при гидроструйной обработке теряется вследствие гидравлических потерь в рукаве.
2. Эффективность гидроструйной обработки может быть повышена путем периодического останова течения за счет роста давления перед соплом.
3. Наибольший эффект достигается на основе использования гидравлического удара.

1. Бойко Ю.А., Кушнир А.П., Лившиц В.Б. Материалы и технологии. – Saarbrücken: Lampert Academic Publishing, 2017. – 225 с.
2. Лившиц В.Б., Кушнир А.П. и др. Изготовление художественных изделий из металлов и сплавов. – М.: URSS, 2019. – 272 с.
3. Кушнир А.П., Лившиц В.Б., Кобзев Д.С. Специальные виды литья художественных изделий. – Saarbrücken: Lampert Academic Publishing, 2015 – 305 с.
4. Кушнир А.П., Лившиц В.Б., Кобзев Д.С. Специальные технологии художественной обработки материалов. (Специальные виды литья и отделки художественных изделий). – М.: ОНТОПРИНТ, 2016 – 262 с.
5. Технология металлов и сплавов. Учебное пособие для академического бакалавриата / Под ред. Кушнир А.П., Лившиц В.Б. – М.: ЮРАЙТ, 2019. – 310 с.
6. Технология металлов и сплавов / ответственные редакторы Кушнир А.П., Лившиц В.Б. – М.: ЮРАЙТ, 2019. – 303 с.
7. Кушнир А.П., Лившиц В.Б. и др. Технология обработки металлов и сплавов. – М.: ОнтоПринт, 2018. – 260 с.
8. Лившиц В. Б., Кушнир А. П. и др. Технология изготовления художественных изделий из металлов и сплавов. В 2-х т. Т1. – М.: ОнтоПринт, 2021. – 257 с.
9. Лившиц В. Б., Кушнир А. П. и др. Технология изготовления художественных изделий из металлов и сплавов. В 2-х т. Т2. – М.: ОнтоПринт, 2021. – 235 с.
10. Кушнир А.П., Крашенинников А.И. Устройство для пескоструйной обработки. Пат. РФ №114632, 2012.
11. Кушнир А.П., Крашенинников А.И. Устройство для пескоструйной обработки. Пат. РФ №115282, 2012.
12. Кушнир А.П., Крашенинников А.И. Устройство для гидроабразивной смеси. Пат. РФ №118908, 2012.
13. Кушнир А.П., Крашенинников А.И., Пупченков Г.С. Форсунка пескоструйного аппарата. Пат. РФ №130903, 2013.

ПОВЫШЕНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕТАЛЕЙ АВТОМОБИЛЕЙ НАНЕСЕНИЕМ УПРОЧНЯЮЩИХ АЛМАЗОПОДОБНЫХ УГЛЕРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ

А.Ю.Албагачиев¹, М.В.Пашков², Р.М.Хисамутдинов², М.М.Хрущов¹

¹Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия;

²ПАО «КАМАЗ», Набережные Челны, Республика Татарстан, Россия

Вопросы повышения ресурса деталей автомобиля в процессе его эксплуатации играют крайне важную роль в машиностроении. Повышение ресурса возможно несколькими способами, в частности, путем нанесения на контактирующие поверхности упрочняющих покрытий. Главной задачей технолога в данном случае является создание поверхностных слоев, способных в течение продолжительного времени обеспечивать высокие триботехнические характеристики поверхности.

Насколько вопрос обеспечения низкого коэффициента трения в контактных поверхностях является важным автомобиля можно увидеть, рассматривая конкретный пример проблемных ситуаций, возникающих в процессе эксплуатации деталей межосевого и межколесного дифференциалов грузового автомобиля (рис. 1).



Рисунок 1. Крестовина и сателлиты межосевого дифференциала

Известно, что отказы серийных дифференциалов в эксплуатации часто происходят по причине выдавливания и раскатки бронзовых втулок, используемых в их конструкции в качестве подшипников скольжения, обеспечивающих низкое трение на поверхностях контакта пары трения «сателлит – шип крестовины» и предотвращающих заклинивание дифференциала. В последние годы в связи с этим отечественными и зарубежными автомобилестроителями широко внедряются дифференциалы с сателлитами без подшипников скольжения (втулок), вместо которых используются покрытия на сопрягаемых поверхностях трения.

Заклинивание дифференциала может приводить к разрушению зубьев зубчатого венца (рис. 2). В

ряде случаев может также происходить, как это показано на рис. 3, «прикипание» сателлитов к шипам крестовины, что приводит к разрушению обоих (рис. 4).



Рисунок 2. Внешний вид разрушенной детали



Рисунок 3. Вид разрушенной детали с прикипевшим сателлитом и шипом крестовины



Рисунок 4. Внешний вид разрушения шипа крестовины после испытаний

Учитывая частое возникновение отказов серийных дифференциалов в эксплуатации, ПАО «КАМАЗ» активно проводит работы по дифференциалам с безвтулочными сателлитами с покрытиями различных. Для этого в ПАО «КАМАЗ» разработаны специальные методики для определения работоспособности узла трансмиссии в целом и имеются специальные испытательные стенды для ее определения, используемые для оценки эффективности работы деталей дифференциала с покрытиями. Применительно к сателлитам и шестерням межосевого дифференциала испытания по оценке долговечности по параметру износостойкости проводятся согласно программе-методике ПМ 37.104.17.1699-2013 «Стен-

довые испытания опытных и серийных межосевых дифференциалов на износостойкость».

Результаты проведенных ранее по этой методике испытаний межосевого дифференциала (МОД), изделие 53205-2506010, с безвтулочными сателлитами, изделие 53205-2506055-10, и крестовиной, изделие 53205-2506060, с полиамидным покрытием фирмы ООО «Лёдов-ПК» (Санкт-Петербург) на износостойкость и повышенную нагрузку приведены в таблицах 1 и 2.

Проводились также сравнительные испытания по использованию различных типов покрытий,

наносимых на детали МОД. Так, было выполнено сравнительное исследование деталей МОД с используемым в настоящее время покрытием, разработанным НПО «Урал», и с покрытием материалом «BALINIT C STAR» фирмы «Oerlikon Balzers Rus», представляющим собой двухслойное покрытие, нижний слой которого содержит нитрид хрома, а верхний представляет собой алмазоподобное углеродное покрытие, легированное карбидом вольфрама. Результаты сравнительных испытаний дифференциалов с покрытиями обоих типов представлены в таблице 3.

Таблица 1. Результаты испытаний опытных межосевых дифференциалов на износостойкость.

Условный номер дифференциала	Результаты измерений					
	Сателлит Ø 22 ^{+0,045}			Крестовина Ø 22 ^{-0,07} ^{-0,045}		
	Ø до испытаний, мм	Ø после испытаний, мм	Средняя величина износа, мм	Ø до испытаний, мм	Ø после испытаний, мм	Средняя величина износа, мм
1	22,028	22,029	0,001	21,948	21,948	0,000
	22,039	22,039	0,001	21,948	21,948	0,000
	22,019	22,020	0,001	21,952	21,952	0,000
	22,031	22,032	0,001	21,951	21,951	0,000
2	22,005	22,015	0,010	21,940	21,937	0,003
	22,015	22,018	0,003	21,947	21,944	0,003
	22,025	22,030	0,005	21,950	21,944	0,006
	22,026	22,029	0,003	21,950	21,950	0,000

Таблица 2. Результаты испытаний на повышенную нагрузку.

Условный номер дифференциала	Испытание пары трения	Техническое состояние после испытаний	Продолжительность испытаний, мин.
1	Дифференциал – сателлиты и крестовина с полиамидным покрытием	Незначительные задиры с наволакиванием на шипах крестовины; пригар на всех деталях.	6
2	Дифференциал – сателлиты и крестовина с полиамидным покрытием	Приваривание трех сателлитов к шипам крестовины с последующим разрушением двух шипов; пригар на всех деталях	3

Таблица 3. Результаты сравнительных испытаний безвтулочных дифференциалов с покрытиями различных типов на повышенную нагрузку.

Условный номер дифференциала	Испытание пары трения	Техническое состояние после испытаний	Продолжительность испытаний, мин.
1	Дифференциал – сателлиты и крестовина с двойным покрытием из вольфрама и «Аркамид-АРА» фирмы НПО «Урал»	Приваривание трех сателлитов к шипам крестовины с последующим разрушением одного шипа.	4
2	Дифференциал – сателлит и крестовина с «BALINIT C STAR» фирмы «Oerlikon Balzers Rus»	Незначительные задиры с наволакиванием на шипах крестовины; пригар на всех деталях	6
3	Дифференциал – сателлит и крестовина с «BALINIT C STAR» фирмы «Oerlikon Balzers Rus»	Приваривание трех сателлитов к шипам крестовины, с последующим разрушением двух шипов; пригар на всех деталях	3

Из приведенных данных видно, что далеко не все из применяемых в настоящее время для повышения антифрикционных свойств пары трения «сателлит – шип крестовины» покрытий могут обеспечить надежную защиту от возможного «прикипания» сателлитов в процессе эксплуатации. В этой связи стоит задача по поиску новых перспективных типов покрытий и технологий их получения.

Одним из таких перспективных типов покрытий являются алмазоподобные углеродные покрытия с уникальным сочетанием физико-механических и триботехнических свойств, когда низкий коэффици-

ент трения и пластичность сочетаются с высокой твердостью и износостойкостью [1].

Структура алмазоподобного углерода предполагает одновременное присутствие в ней различных аллотропных модификаций в состояниях с преимущественной «алмазной» тетраэдрической sp^3 -, графитоподобной sp^2 - и линейно-цепочечной sp -координацией углеродных атомов.

В настоящее время имеются многочисленные примеры успешного использования алмазоподобных покрытий в промышленности, в частности, автомобильной. Согласно [2, 3], основными областями их

применения являются упрочняющие покрытия, наносимые на обрабатывающий инструмент и ответственные детали двигателей внутреннего сгорания, декоративные и защитные покрытия стекол и осветительного оборудования. Имеющиеся данные говорят о перспективности использования алмазоподобных покрытий в зубчатых передачах, где их нанесение позволяет снизить износ, особенно при работе в условиях недостаточного смазывания [2].

С целью решения конкретной задачи производства ПАО «КАМАЗ» совместно с Институтом машиноведения им. А.А. Благонравова РАН в настоящее время проводится научно-исследовательская работа, направленная на решение задачи снижения коэффициента трения в паре «шип крестовины – внутреннее отверстие сателлита» межколесного и межосевого дифференциала.

Проведя анализ испытаний, проведенных в лабораториях ПАО «КАМАЗ», на натурных образцах, было определено, что наиболее перспективным направлением развития является использование алмазоподобных покрытий.

На первоначальном этапе работ был проведен поиск наиболее подходящего для данных условий работ материала покрытия. Был проведен анализ трибологического поведения алмазоподобных покрытий, легированных различными переходными элементами [4], обеспечивающих высокую износостойкость и низкое трение поверхностей трибосопрежения. Рассматривались покрытия, которые содержали (1) хром; (2) карбид хрома; (3) титан; (4) карбид титана; (5) вольфрам; (6) карбид вольфрама; (7) кремний и (8) карбид кремния и могли наноситься

на одну или обе контактирующие поверхности. В качестве возможных кандидатов рассматривались покрытия $TiC/a-C:H$, $WC/a-C:H$, $TiC/a-C:H$, $CrC_x/a-C:H$, $Si/a-C:H$, $SiO_x/a-C:H$ и др., многие из которых обладают нанокompозитной структурой.

На основе проведенного анализа было принято решение об использовании для дальнейших исследований в рамках проводимых работ по повышению трибологических свойств поверхностей деталей МКД/МОД алмазоподобных покрытий, легированных хромом, полученных по технологии магнетронного напыления.

В результате совместных работ Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН и КАМАЗа была изготовлена опытная партия сателлитов межосевого и межколесного дифференциала с нанесенным на них легированным алмазоподобным покрытием.

В настоящее время детали проходят испытания в Научно-техническом центре ПАО «КАМАЗ».

1. Семенов А.П. Трибологические свойства и вакуумные ионно-плазменные методы получения алмазных и алмазоподобных покрытий // Трение и износ. 2009. Т.30. № 1. С. 83-102.
2. Bewilogua K., Bräuer G., Dietz A. et al. Surface technology for automotive engineering // CIRP Annals – Manuf. Technol. 2009. V.58. P.608-627.
3. Johnson S.V., Hainsworth S.V. Effect of DLC coatings on wear in automotive applications // Surf. Eng. 2005. V.21. P.67-71.
4. Хрущов М.М. Легированные алмазоподобные покрытия трибологического назначения // Современные технологии модифицирования поверхностей деталей машин. Под ред. Г.В. Москвитина М.: УРСС / КРАСАНД – 2013. – 400с.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ (СТП)

А.Ю. Албагачиев¹, В.Е. Прохорович²

¹Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; ²Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Проведен теоретический анализ сварки трением с перемешиванием. Рассмотрены пластическое течение с использованием механики сплошной среды, теплофизика и колебания.

Ключевые слова: Трение, сварка, СТП, пластическое течение, температура.

Введение

Сварка трением с перемешиванием (СТП) трудносвариваемых материалов прочно вошла в технологию 21 века. Ее используют при получении неразъемных соединений как одноименных так разнородных металлов и полимерных материалов в авиакосмической, судостроительной, железнодорожной и других транспортных отраслях. Бурное развитие СТП получила в зарубежных производствах ведущих стран мира [1].

Сущность метода СТП – вращающийся инструмент перемещается по стыку свариваемых деталей с нормальной нагрузкой (рис. 1).

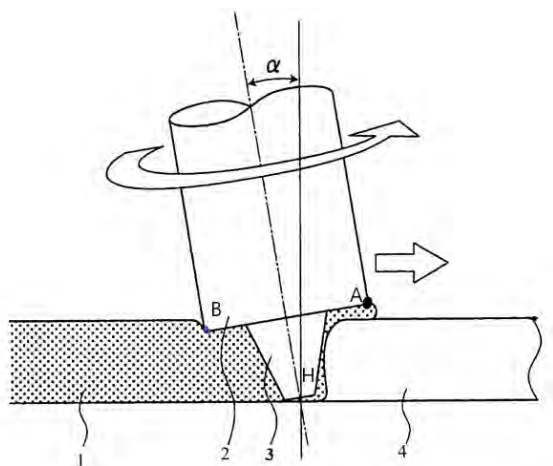


Рисунок 1. Схема сварки трения с перемешиванием:
1 – шов; 2 – заплечик; 3 – пин; 4 – свариваемые объекты.

Метод СТП имеет явные преимущества по сравнению со ВСЕМИ другими видами сварки по:

- способу реализации технологии СТП (сварка осуществляется без подвода энергии для плавления, без использования присадочного материала и защитного инертного газа, метод достаточно прост в реализации – вращающийся инструмент состоящий из заплечика и пина, перемещаясь в зоне стыка, осуществляет с высокой производительностью сварку при относительно невысокой температуре);
- качеству сварного соединения (статическая и усталостная прочность соединения, коррозионная стойкость, уровень сварочных деформаций);
- технологичности (низкие трудоёмкость и энергоёмкость и высокая экологическая безопасность).

При обеспечении оптимальных режимов СТП основные механические характеристики сварного соединения (предел прочности, относительное удлинение, относительное сужение, предел усталости, коррозионная стойкость), приведенные в таблице 1, сформированной по результатам опытной отработки СТП в КБ «Салют» в 2006 году при разработке технологии СТП двух видов сварных швов тонкостенного лейнера, а в 2015 году на несущих оболочках баков «Г» и «О» УРМ-1 [1], находятся на уровне соответствующих характеристик основного материала свариваемых деталей. А такие характеристики сварного соединения как ударная вязкость, остаточная прочность после испытаний на малоцикловую усталость и пр. превосходят соответствующие показатели качества основного металла.

Таблица 1. Механические характеристики сварных соединений.

	Сплав АМг6М	СТП АМг6М - АМг6М	АрДЭС АМг6М - АМг6М
σ_B , кгс/мм ²	32	32	27
Испытания на коррозию под напряжением ($\sigma=22$ кг/мм ²)	Время 45 сут. Разрушения нет	Время 45 сут. Разрушения нет	-
KCU, кгс м/см ²	1,6	3,6-3,8 (шов) 2,9-3,6 (зона сплавления)	2 (шов) 1,6 (зона сплавления)
Остаточная прочность после испытаний на малоцикловую усталость, σ_B , кгс/мм ²		≥ 32 (для АМг6)	
Характеристики пластичности (относительное удлинение δ и относительное сужение ψ)		на уровне основного материала	на ~ 10 – 20 % ниже основного материала
Предел усталости σ_{-1}		на уровне основного материала	на ~ 10 – 20 % ниже основного материала

Вместе с несомненными преимуществами СТП, отмеченными выше, следует рассмотреть и проанализировать следующие недостатки (особенности) этой технологии сварки применительно к алюминиевым сплавам:

- 1) формирование несимметричного шва вследствие неравномерного съема материала со стыкуемых кромок и его переноса;
- 2) вращающийся инструмент оставляет на поверхности шва приливы;
- 3) изгибающие нагрузки, возникающие при перемещении инструмента, а также нагрев зоны сварки, создают условия, провоцирующие износ и даже разрушение инструмента;
- 4) частицы пленки оксида алюминия, которые имеют температуру плавления около 2000°C, после разрушения пином попадают в сварочный шов снижая его качество и усталостную прочность;
- 5) набегающая и отстающая стороны имеют отличающиеся скорости перемещения пластифицированного материала, а процесс перемешивания происходит при различных давлениях и температурах.

Отмеченные выше поразительные свойства сварного соединения, а также особенности процесса перемешивания пластифицированного материала вызывают необходимость изучения и осмысления физических явлений, сопровождающих процесс соединения пластин из алюминиевых сплавов.

Как нам представляется, более глубокое погружение в «физику» процесса СТП, например, за счет изучения контактных явлений взаимодействия деформируемых материалов, вполне возможно, позволит выработать рекомендации технологам и инженерам, занимающимся разработкой инструментов и подбором оптимальных режимов СТП конкретных соединений.

Одна из первых попыток такого погружения предлагается в настоящей статье.

Анализ напряженного и деформированного состояний при СТП

В теоретическом анализе использовали подход (метод пластического течения) к выдавливанию стержней Воронцова А.Л. [2]. В качестве основного допущения принимали жесткопластическую модель несжимаемого, деформируемого материала.

$$V_x = V_x(x, y, z, t); V_y = V_y(x, y, z, t); V_z = V_z(x, y, z, t)$$

По скоростям течения находятся компоненты скорости деформации (1), напряжения текучести (2) и уравнения равновесия (3), которые приведены в тензорном виде и в цилиндрических координатах (4.5, 6):

$$\zeta_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad (1)$$

$$\sigma_{ij} = \delta_{ij} \sigma + \frac{2\zeta_{ij}}{3\zeta_i} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} = 0, \quad (3)$$

В цилиндрических координатах (1):

$$\begin{aligned} \zeta_r &= \frac{\partial v_r}{\partial r}, \\ \zeta_\theta &= \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{v_r}{r}, \\ \zeta_z &= \frac{\partial v_z}{\partial z}, \\ \eta_{rz} &= \frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r}, \\ \eta_{z\theta} &= \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} + \frac{\partial v_\theta}{\partial z}, \\ \eta_{\theta r} &= \frac{\partial v_\theta}{\partial r} - \frac{v_\theta}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} \end{aligned} \quad (4)$$

где v_r, v_θ, v_z – скорости течения; $\zeta_r, \zeta_\theta, \zeta_z$ – интенсивность скоростей деформаций; $\eta_{rz}, \eta_{z\theta}, \eta_{\theta r}$ – скорости угловых деформаций; r, θ, z – координаты радиальная, угловая, осевая.

Система (2) в цилиндрических координатах:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \sigma + \frac{2\zeta_r}{3\zeta_i}, \\ \sigma_\theta &= \sigma + \frac{2\zeta_\theta}{3\zeta_i}, \\ \sigma_z &= \sigma + \frac{2\zeta_z}{3\zeta_i}, \\ \tau_{rz} &= \frac{1}{3\zeta_i} \eta_{rz}, \\ \tau_{z\theta} &= \frac{1}{3\zeta_i} \eta_{z\theta}, \\ \tau_{\theta r} &= \frac{1}{3\zeta_i} \eta_{\theta r}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\sigma = \frac{\sigma_r + \sigma_\theta + \sigma_z}{3}$ – среднее главное напряжение (гидростатическое давление).

В цилиндрических координатах уравнение равновесия (3), применительно к рассматриваемой проблеме СТП имеет вид:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r},$$

$$\frac{\partial \tau_{z\theta}}{\partial z} = 0, \quad (6)$$

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\tau_{rz}}{r},$$

$$V_r = K_1 \frac{V_{cs} \cos \varphi}{OH} (OH - Z) \text{ при } r_1 \cos \alpha \leq r \leq R \cos \alpha$$

$$V_r = \frac{V_{cs} \cos \varphi}{OH R} (OH - Z)(R_1 - r) \text{ при } R \cos \alpha \leq r \leq R_1$$

R_1 – значение r , при котором $V_r = 0$

$$V_\varphi = (\omega r + V_{cs} \sin \varphi) \frac{OH - Z}{OH} \text{ при } r_1 \cos \alpha \leq r \leq R \cos \alpha$$

$$V_\varphi = (\omega r + V_{cs} \sin \varphi) \frac{(OH - Z)(R_1 - r)}{OH R} \text{ при } R \cos \alpha \leq r \leq R_1$$

R_2 – значение r , при котором $V_\varphi = 0$

$$V_z = K \frac{V_{cs} (C_1 Z^2 + C_2 Z + C_3)}{OH^2}; \text{ или } V_z = K V_{cs} \left(\frac{C_1 Z^2}{OH^2} + \frac{C_2 Z}{OH} + C_3 \right)$$

$C_1 C_2 C_3$ – определяем из граничных условий;

$$1) V_z(Z = Z_B) = V_{cs} \sin \alpha \cos \alpha$$

$$2) V_z(Z = Z_A) = V_z(Z = Z_B) \quad 3) V_z(Z = OH) = 0$$

Колебания при СТП

При СТП возникают нормальные и тангенциальные колебания бурта, пина и свариваемых объектов в которых при совпадении частот собственных и вынужденных колебаний имеет место контактные нормальные и тангенциальные резонансы.

$$\nu_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_n}{m_n}}; \nu_T = \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{C_T}{m_T}},$$

где C_n и C_T – нормальная и тангенциальная жесткости; m_n, m_T – нормальная и тангенциальная массы. Частоту вынужденных колебаний рассчитывают через вращение и перемещения.

Для определения контактного резонанса у свариваемых объектов можно использовать скорость распространения упругих волн, которая для различных металлов известна.

Применимость формул волновой теории или классической механики можно определить по критерию [2]:

$$\beta = \frac{t}{T},$$

где t – время контактного взаимодействия поверхностей; T – период собственных колебаний $T = 2l \sqrt{\frac{v}{E}}$; v – скорость распространения упругой волны; l – протяженность объекта; E – модуль упругости.

При этом, если критерий $\beta < 3 \dots 5$, то в расчетах следует использовать волновую теорию.

где $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$ – напряжения радиальные, угловые, осевые; $\tau_{rz}, \tau_{z\theta}, \tau_{\rho z}$ – касательные напряжения.

Начальные и граничные условия для заплечика с углом наклона α , и с учетом осевых V_z , радиальных V_r и угловых скоростей V_φ при СТП использованные нами при решении приведены ниже:

(7)

Модели температуры заплечика и пина

Максимально мощный источник тепла возникает при трении пары «заплечик – свариваемые поверхности». В остальных зонах СТП мощности источника тепла значительно ниже (Рис. 2).

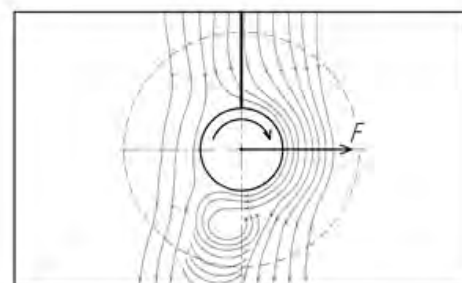
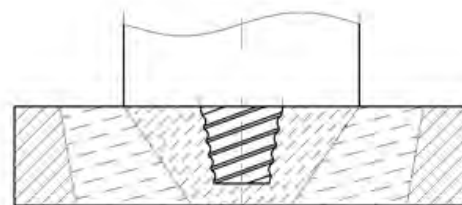


Рисунок 2. Схема обтекания инструмента пластическими текучими свариваемыми материалами.

Температурный режим при трении заплечика по сварочному шву сведем к решению дифференциального уравнения:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \quad (8)$$

с начальными и граничным условием для заплечика:

$$\theta = 0 \quad \text{при } t=0 \quad (9)$$

$$-\lambda \frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{(1 - \alpha_{\text{тл}}) f P V (1 - \frac{r}{R})}{A} \quad (10)$$

$$\theta = 0 \quad \text{при } z \rightarrow \infty \quad (11)$$

и для пина:

$$-\lambda \frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{(1 - \alpha_{\text{тл}}) \tau V (1 - \frac{z}{H})}{A}$$

Уравнение (3) решали операционным исчислением.

Для **набегающего** течения металла получено:

$$\theta(z, t) = \frac{(1 - \alpha_{\text{тл}}) f P V}{A \lambda \sqrt{\pi}} \left(1 - \frac{r}{R} \right) \left[2 \sqrt{at} \exp \left(-\frac{z^2}{4at} \right) - \sqrt{\pi} \operatorname{erfc} \left(\frac{z}{2\sqrt{at}} \right) \right], \quad (12)$$

где P – нормальная сила; V – результирующая скорость (корень из суммы квадратов линейной скорости вращения и перемещения по стыку); t – время; z – координата.

Для **отстающего** течения металла результирующая скорость выразим через корень из разности квадратов скоростей вращения и перемещения заплечика

Для пина полученная формула имеет вид:

$$\theta(z, t) = \frac{(1 - \alpha_{\text{тл}}) \tau V}{\lambda \sqrt{\pi}} \left(1 - \frac{z}{H} \right) \left[2 \sqrt{at} \exp \left(-\frac{z^2}{4at} \right) - \sqrt{\pi} \operatorname{erfc} \left(\frac{z}{2\sqrt{at}} \right) \right] \quad (13)$$

Для моделирования теплообмена между движущимся пином и перемешивающимися текучими свариваемыми металлическими телами можно использовать трехмерную модель теплопроводности Фурье:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) \quad (14)$$

Решение дифференциального уравнения (14) для мгновенного неподвижного источника тепла было получено Кельвином в следующем виде:

$$\theta = \frac{Q}{4\pi s (\pi at)^{\frac{3}{2}}} \exp \left(-\frac{R^2}{4at} \right), \quad (15)$$

где Q – количество теплоты; s – теплоемкость; R – расстояние от рассматриваемой точки полупространства до начала координат.

Из (9) получена формула расчета температуры при напряжениях сдвига материала, создаваемых стационарно вращающимся и движущимся пином

$$\theta = \frac{(1 - \alpha_{\text{тл}}) \tau V t}{4\pi s (\pi at)^{\frac{3}{2}}} \exp \left(-\frac{V}{2a} (x + R) \right), \quad (16)$$

где τ – напряжение сдвига свариваемых объектов; V – скорость сдвига; x – координата.

Для **набегающего** течения металла скорость сдвига равна корню из суммы квадратов линейной скорости пина и скорости его перемещения. Для **отстающего** течения скорость сдвига следует опреде-

лять из их разности. Эти различия следует учитывать при использовании моделей

Следует отметить, что приведенные модели предназначены для вращающегося заплечика и пина при СТП где имеет место турбулентное обтекание инструмента.

Если пин и заплечик при СТП перемещаются по стыку без вращения, то обтекание пластическим металлом инструмента будет ламинарным и не будет различие скоростей между набегающим и отстающим потоками. Установятся одинаковые температуры.

Так как перегрев снижает усталостную прочность шва за счет образования пор и высоких температурных растягивающих остаточных напряжений, для регулирования тепловыми потоками генерируемыми при СТП, авторы предлагают конструкцию инструмента выполнить в виде тепловой трубки, которая при достижении оптимальной для сварки температуры будет включаться и отводить теплоту.

Заключение

Таким образом, в процессе анализа СТП предложены аналитические зависимости для проведения инженерных теплофизических расчетов и остаточных напряжений. По ним можно проводить оптимизацию режимов сварки (скоростей вращения и перемещения инструмента и давлений) при СТП обратным путем, т.е. подставляя оптимальную, полученную экспериментальным путем температуру (например, 400°C при сварке алюминия с алюминием) в формулы и определяя по ним рациональные скорость и давление. По такой же процедуре можно оптимизировать и остаточные напряжения.

Решением методом пластического течения приведенных дифференциальных уравнений при граничных условиях (7) получены ряд аналитических зависимостей для расчета касательных и нормальных напряжений, накопленной деформации при СТП, т.е. можно определить кинематическое, напряженное и деформированное состояние в любой точке очага пластической деформации с учетом анизотропии, которые проверяются сопоставлением расчетных данных с численно-экспериментальными.

Представленный подход позволит конструкторам и технологам формировать рекомендации для разработки оптимальных режимов СТП для конкретных материалов и соединений, а также для разработки инструмента для СТП.

1. Варочко А.Г., Кузнецов С.В., Половцев В.А., Саратов Н.Н., Прохорович В.Е., Быченко В.А. История становления и перспективы развития технологии сварки трением с перемешиванием в АО «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева» // Технологии машиностроения. 2021. № 4. С. 16-41.
2. Воронцов А.Л. Теория штамповки выдавливанием. М.: Машиностроение-1. 2004. 721 с.
3. Виноградов В.Н., Сорокин Г.М., Албагачиев А.Ю. Изнашивание при ударе. М.: Машиностроение. 1982. 192 с.

АНАЛИЗ ОБЛАСТЕЙ РАБОТОСПОСОБНОСТИ МЕХАНИЗМОВ ЦИКЛИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ НА ПРИМЕРЕ ПОВОРОТНЫХ СТОЛОВ

А.К. Алешин, Н.Л. Ковалева, Г.И. Фирсов

Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; firsovgi@mail.ru

Приведены результаты экспериментальных исследований процессов появления дефектных состояний механизмов поворотных столов. Выявлены основные критерии работоспособного состояния механизмов, включающих время цикла и значение погрешности углового деления.

Одним из элементов мехатронных систем с механизмами циклического действия, входящими в состав машин различного технологического назначения [1,2], входят поворотные столы, быстродействие, точность отладки цикла и надежность работы которых во многом определяют точность и производительность работы всей машины.

Эти показатели поворотных столов зависят не только от конструкции, но и от качества изготовления, регулирования, культуры технического обслуживания и ремонта. Длительность цикла работы поворотных столов может достигать 50% времени холостых ходов машины. Кроме того, в зависимости от технического состояния, качества регулирования время цикла работы стола может превышать допустимое в 3-4 раза.

Особенность поворотных столов состоит в том, что устранение их поломок сопряжено с проведением дополнительных монтажно-демонтажных работ: снятием приспособления с планшайбы, инструментальной оснастки, демонтажем зажимных устройств, ограждений. Все это приводит к увеличению трудоемкости ремонта.

К дефектам поворотных столов могут быть отнесены, в частности:

- недопустимо большая погрешность углового деления,
- недостаточная установившаяся скорость вращения планшайбы,
- недопустимые динамические нагрузки на детали механизмов поворота и фиксации,
- неравномерная скорость поворота планшайбы при реверсе,
- повышенные силы сопротивления в механизме поворота планшайбы и гидросистеме,
- недопустимо большая длительность цикла из-за плохой отладки стола.

Перечисленные дефекты влекут за собой снижение точности обработки деталей на станках, снижение быстродействия, повышенный расход энергии, снижение точности фиксации, поломку деталей.

Дефекты поворотных столов, определяющие надежность его работы, можно подразделить на дефекты, устранимые регулировкой, без разборки и замены деталей, так и дефекты, устранение которых связано с разборкой отдельных узлов и заменой деталей, что приводит к увеличению трудоемкости ремонта.

Поэтому одним из путей решения задачи повы-

шения быстродействия и надежности поворотных столов, наряду с совершенствованием конструкций, является диагностирование на всех этапах жизненного цикла (производство, эксплуатация, ремонт). Одним из важных элементов создания системы диагностики [3, 4] является выбор диагностических признаков, обладающих достаточной информативностью с точки зрения выявления того или иного дефекта поворотного стола.

В настоящее время широкое применение для диагностирования механических систем получили методы диагностики по кинематическим, силовым и энергетическим параметрам - ускорению, скорости, перемещению исполнительных звеньев, давлению в гидросистеме, силе тока и мощности в сети питания [5-8]. Широкое применение указанных методов связано с тем, что они обладают следующими преимуществами:

могут быть проконтролированы паспортные характеристики узлов;

кинематические, силовые и точностные параметры непосредственно связаны с дефектами;

диагностическая информация может быть использована также для конструкторских и технологических расчетов и совершенствования конструкций узлов.

Возможность выявления дефектов указанными методами основана на том, что наличие дефекта приводит к отклонению реальной осциллограммы диагностического параметра (скорости, ускорения, давления) от эталонной, установленной заранее. По виду их рассогласования, а также по характерным амплитудным значениям, временным интервалам делается заключение о наличии конкретного дефекта.

В качестве объектов диагностирования выбраны два типа поворотных столов (табл. 1).

Первый - с зубчатым редуктором и механизмом двойной фиксации, широко применяемый в условиях массового и крупносерийного производства.

Второй - с реечной передачей и механизмом фиксации из плоских зубчатых колес, используемый в условиях серийного и мелкосерийного производства. Это связано с широкими возможностями переналадки его на различное число позиций деления z . Переналаживаемость оценивается диапазоном изменения z . У столов второго типа она больше в 8 раз.

Одной из основных задач при разработке методики диагностирования является определение обла-

сти работоспособного состояния. Требования технических условий, приводимые в паспорте на поворотные столы, как правило, не содержат необходимых критериев, позволяющих контролировать текущее техническое состояние и проводить качественное регулирование; это затрудняет также изучение и анализ возможных дефектов.

Отсутствие указанных критериев в паспортных данных связано со значительной трудоемкостью и отсутствием необходимой методики их определения. Кроме того, разработка норм на критерии работоспособного состояния осложняется ограниченностью исходной экспериментальной информации о свойствах поворотных столов.

Таблица 1. Параметры поворотных столов

Параметр, размерность	Значение параметра для поворотного стола	
	с зубчатым редуктором и механизмом двойной фиксации	с реечной передачей и механизмом фиксации из плоских зубчатых колес
Перенаалаживаемость z_{max}/z_{min}	6	48
Быстродействие T_n (при $z = 6$ и максимальной нагрузке), с	$\leq 3,8$	$\leq 1,4$
Погрешность углового деления δ_ψ	$4 - 13''$	$\leq 6''$
Жесткость, Н/м	$10^7 - 3 \times 10^7$ (средняя)	$> 10^8$ (высокая)

Область работоспособных состояний целесообразно определять с помощью комплекса количественных критериев и затем на их основе разрабатывать для каждого дефекта ряд количественных диагностических признаков [3, 4]. Это значительно упрощает диагностирование и повышает достоверность локализации дефектов.

При этом основные критерии работоспособного состояния определяются исходя из служебного назначения поворотных столов (перемещать обрабатываемые детали из одной рабочей позиции в другую и точно фиксировать их в позициях обработки).

Отсюда следует, что должны быть установлены допустимые значения времени цикла T_n в зависимости от числа позиций деления z и момента инерции J подвижных масс, а также значение погрешности δ_ψ углового деления.

Отсутствие в паспорте на поворотные столы дифференцированных норм на допустимое значение T_n приводило к тому, что оно либо чрезмерно увеличено (до четырех раз по отношению к номинальному), либо уменьшено.

Увеличение T_n приводит к неоправданному возрастанию цикловых потерь станка, а необоснованное его уменьшение - к возрастанию динамических нагрузок на детали механизмов поворота и фиксации планшайбы. В результате увеличивается погрешность δ_ψ углового деления и разрушаются детали привода.

Например, фактические нагрузки на фиксатор в ряде случаев достигают 2 т. Отсюда следует необходимость ограничения наряду с критериями T_n и δ_ψ наибольших динамических нагрузок. поскольку в производственных условиях легче контролировать ускорение планшайбы $\varepsilon(t)$, чем динамические нагрузки (динамический крутящий момент M_d), целесообразно ограничивать допустимые ускорения планшайбы.

Таким образом, требования технических условий на поворотные столы дополняются дифференцированными нормами на длительность цикла и допустимыми ускорениями планшайбы. Если нет дифференцированных ограничений на значение погрешности δ_ψ , то их также необходимо установить.

Методика определения критериев основана на сочетании методов математического моделирования [9]. и квалитетической обработки экспериментальных данных, а также на последовательном уточнении значений критериев по мере накопления опытных данных. Особенность ее состоит в том, что она позволяет расширить имеющийся в распоряжении конструктора ограниченный объем данных по быстродействию. Это достигается путем использования зависимости средней скорости планшайбы ω_{cp0} поворотного стола от момента инерции J подвижных масс [2]:

$$\omega_{cp0} = K_0 / \sqrt[3]{J}, \quad (1)$$

где K_0 - коэффициент быстроходности.

Определив по экспериментальным данным доверительный интервал на указанную зависимость (1), можно установить для конкретной конструкции стола время поворота t_n для произвольных чисел позиций деления z и момента инерции подвижных масс.

Методика определения критериев включает следующие основные этапы:

- разработка математической модели гидромеханической системы поворотного стола;
- определение допустимых ускорений планшайбы из расчетов на прочность деталей механизмов привода поворота и фиксации (они используются не только при уточнении паспортных данных, но и при моделировании);
- расчет на математической модели времени поворота t_n планшайбы и значений поправочного коэффициента K_ψ в зависимости от числа позиций деления z ;
- определение по экспериментальным данным времени t_n в зависимости от z ; сравнение расчетных и экспериментальных значений времени и уточнение в случае необходимости математической модели;
- уточнение значений критериев по мере поступления экспериментальных данных в процессе диагностирования серийно выпускаемых поворотных столов.

На начальном этапе определения критериев имеется разброс экспериментальных данных по дли-

тельности цикла работы столов, так как данные получены при различных значениях z и J (табл. 2). При этом средняя скорость $\omega_{ср0}$, а следовательно, и время поворота t_n зависят как от J , так и от угла поворота планшайбы ψ (или числа позиций деления z). Это неизбежно вносит искажения в зависимость средней скорости $\omega_{ср0}$ от момента инерции J .

Для устранения влияния z при определении доверительного интервала на зависимость (1) вводится поправочный коэффициент K_ψ , равный отношению средней скорости поворота $\omega_{ср0\psi}$ на угол ψ к средней скорости поворота $\omega_{ср0\pi/3}$ на угол $\pi/3$ радиан $K_\psi = \omega_{ср0\psi} / \omega_{ср0\pi/3}$.

Угол поворота $\pi/3$ ($z = 6$) является наиболее часто применяемым в практике проектирования поворотных столов.

Таблица 2. Результаты экспериментальных исследований поворотных столов

Тип стола	J , кгм ²	z	t_n , с
С механизмом фиксации из плоских зубчатых колес	1,2	4	0,82
	2,0	6	0,90
	1,8	48	0,26
	1,5	8	0,8
С зубчатым редуктором и механизмом двойной фиксации	200	3	4,2
	190	3	4,0
	1170	7	4,2
	260	6	3,4
	200	5	2,9
	250	4	4,4
	850	4	5,6
	600	4	5,8
	250	4	6,2
	280	6	3,0
	450	6	2,8
	200	3	5,0
	360	4	4,6
	270	5	4,2
Тип стола	$\omega_{ср0}$, рад/с	K_0 , кг ^{1/3} м ^{2/3} /с ⁻¹	K_0/K_ψ , кг ^{1/3} м ^{2/3} /с ⁻¹
С механизмом фиксации из плоских зубчатых колес	1,8	1,91	1,67
	1,2	1,50	1,5
	0,5	0,62	1,5
	0,98	1,24	1,4
С зубчатым редуктором и механизмом двойной фиксации	0,50	2,89	2,63
	0,52	2,97	2,70
	0,21	2,40	2,42
	0,31	1,97	1,97
	0,43	2,53	2,49
	0,36	2,32	2,09
	0,28	2,61	2,46
	0,27	2,24	2,11
	0,25	1,61	1,45
	0,35	2,29	2,29
	0,37	2,84	2,84
	0,42	2,45	2,11
	0,34	2,42	2,21
	0,30	1,94	1,94

В технических условиях на поворотные столы с механизмом фиксации из плоских зубчатых колес отсутствуют дифференцированные нормы на длительность цикла T_n в зависимости от угла поворота

планшайбы и не приводятся ограничения на допустимые ускорения планшайбы ε [6].

В результате при эксплуатации возникали аварии, связанные с разрушением винтов крепления планшайбы к центральной оси. Динамические нагрузки в 5 раз превышали допустимые.

Из пяти обследованных в условиях эксплуатации поворотных столов у двух наблюдались указанные аварийные поломки.

1. Рязанов С.И., Псигин Ю.В., Веткасов Н.И. Автоматизация производственных процессов в машиностроении (робототехника, робототехнические комплексы). Ульяновск: УлГТУ, 2018. 162 с.
2. Нахапетян Е.Г. Контроль и диагностирование автоматического оборудования. М.: Наука, 1990. 272 с.
3. Мозгалецкий А.В., Гаскаров Д.Б. Техническая диагностика. М.: Высш. школа, 1975. 248 с.
4. Биргер И.А. Техническая диагностика. М.: Машиностроение, 1978. 238 с.
5. Алешин А.К., Ковалева Н.Л., Фирсов Г.И. Разработка процедуры оперативного диагностирования мехатронных систем с механизмами циклического действия // Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении. VI Международная научная конференция. (Москва, 26-27 ноября 2019 г.). Научные труды. – М.: ИМАШ РАН, 2019. С. 37-39.
6. Алешин А.К., Нахапетян Е.Г., Щербак В.В. Диагностирование многопозиционного технологического оборудования при эксплуатации. – М.: Машиностроение, 1984. – 68 с.
7. Алешин А.К., Ковалева Н.Л., Фирсов Г.И. Использование статистических характеристик законов движения в задачах диагностики цикловых механизмов машин // Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении. III Международная научная конференция. (Москва, 13-15 мая 2014 г.). Научные труды. М.: Издательский дом «Спектр», 2014. С. 30-32.
8. Алешин А.К., Ковалева Н.Л., Статников И.Н., Фирсов Г.И. Метод планируемого вычислительного эксперимента в задачах определения дефектных состояний механических систем // Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении. IV Международная научная конференция. (Москва, 24-26 ноября 2015 г.). Научные труды. М.: Издательский дом «Спектр», 2015. С. 33-35.
9. Статников И.Н., Фирсов Г.И. Исследование и моделирование гидропривода поворотного стола методом планируемого вычислительного эксперимента // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ-33. XXXIII Международная научная конференция. (Казань, 14 -18 сентября 2020 г.). Сборник трудов. Том 12, часть 1. Санкт-Петербург: Издательство Политехнического университета, 2020. С. 63-68.

ОЦЕНИВАНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ ЦЕННОСТИ КРИТЕРИЕВ РАБОТОСПОСОБНОСТИ МЕХАНИЗМОВ ЦИКЛИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ В НАТУРНОМ И МАТЕМАТИЧЕСКОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

А.К. Алешин, Н.Л. Ковалева, Г.И. Фирсов

Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; firsovgi@mail.ru

С помощью математической модели механизма поворота планшайбы с учетом зазора в кинематической цепи, а также сжимаемости рабочей жидкости определены значения показателей работоспособности поворотных столов. Установлен комплекс диагностических признаков для распознавания дефектов механизмов поворотного стола.

Анализ особенностей функционирования и исследования причин возникновения дефектов функционирующего, но неработоспособного механизма поворота планшайбы поворотного стола заключаются в том, что в этом случае проявляется влияние динамических явлений в механизме и возрастает их значение для диагностирования состояния поворотного стола. Поэтому диагностическая процедура включает в себя исследование динамики рабочих процессов и динамических параметров объекта. Для выявления влияния динамических параметров на динамику и погрешность позиционирования целесообразно наряду с натурным экспериментом [1,2] использовать методы математического моделирования [3], позволяющие проводить исследования модели в условиях изменения конструктивных и рабочих параметров узла в широких пределах, так как натурные эксперименты не всегда позволяют проводить подобные исследования.

Для расчета критериев работоспособного состояния разработана математическая модель механизма поворота планшайбы с учетом зазора в кинематической цепи, а также сжимаемости рабочей жидкости. Система уравнений имеет вид:

$$\begin{aligned} \dot{p}_1 \left(\frac{1}{E} + \alpha \frac{p_0}{p_1^2} \right) (W_1 + Fx_1) &= \frac{p_n - p_l}{Aq} - F\dot{x}_1, \\ \dot{p}_2 \left(\frac{1}{E} + \alpha \frac{p_0}{p_1^2} \right) (W_2 - Fx_1) &= \\ &= F\dot{x}_1 - \frac{-A + \sqrt{A^2 + 4 \left[\frac{\sqrt{U(x_1)B_\tau}}{\sqrt{U(x_1)} + \sqrt{B_\tau}} \right] (p_1 - p_2)}}{2 \left[\frac{\sqrt{U(x_1)B_\tau}}{\sqrt{U(x_1)} + \sqrt{B_\tau}} \right]^2}, \\ U(x_1) &= \begin{cases} B_c, & \text{если } x_1 < S_{\text{щ}}, \\ B_c + B_{\text{щ}}(x_1), & \text{если } S_{\text{щ}} < x_1 < S_1, \\ \infty, & \text{если } x_1 > S_1, \end{cases} \\ \ddot{x}_1 &= \frac{F}{m_1} (p_1 - p_2) - \frac{F_c}{m_1} - \frac{F_1}{m_1}, \\ \ddot{x}_2 &= \frac{F_c}{m_2} - \frac{F_1}{m_2}, \end{aligned} \quad (1)$$

где m_1, m_2 - массы поршня и планшайбы; p_1, p_2 - давления в полостях нагнетания и слива; A, B_c, B_τ -

коэффициенты гидравлического сопротивления дросселей (B_c - дросселя скорости, B_τ - торможения); W_1, W_2 - объемы полостей гидроцилиндра; p_n - давление настройки переливного клапана; A_q - характеристика переливного клапана; $B_{\text{щ}}(x_1)$ - коэффициент гидравлического сопротивления щели; E - объемный модуль упругости; α - отношение объемов нерастворенного воздуха к объему рабочей жидкости; F - площадь поршня; p_l - подпор давления в сливной магистрали; $x_1, \dot{x}_1, \ddot{x}_1$ - координата, скорость и ускорение массы m_1 ; $x_2, \dot{x}_2, \ddot{x}_2$ - координата, скорость и ускорение массы m_2 ; p_0 - атмосферное давление; F_1 - сила трения в уплотнениях поршня гидроцилиндра; $S_{\text{щ}}$ - расстояние до перекрываемой щели; F_2 -- сила трения в опорах планшайбы; F_c - нелинейная функция типа «зазор»; S - координата перекрытия щели.

Связь координат $\dot{x}_2$ и $\ddot{x}_2$ массы m_2 с угловыми скоростью $\omega(t)$ и ускорением $\varepsilon(t)$ планшайбы имеет вид $\omega(t) = \dot{x}_2 / R_n, \varepsilon(t) = \ddot{x}_2 / R_n$, где R_n - радиус начальной окружности колеса реечного зацепления. Из циклограммы работы стола следует, что длительность цикла $T_{\text{ц}}$ складывается из времени поворота $t_{\text{п}}$ планшайбы на угол ψ , времени подъема t_1 планшайбы (расфиксация) и времени опускания t_2 (фиксация). Значения t_1 и t_2 не зависят от числа позиций z , значений подвижных масс и составляют в сумме примерно 0,6 с. Тогда $T_{\text{ц}} = t_{\text{п}} + 0,6$ с. Для определения $T_{\text{ц}}$ с помощью математической модели рассчитывалось значение $t_{\text{п}}$ в зависимости от z .

Для этого из решения системы дифференциальных уравнений (1) определялась функция $\dot{x}_2$, а следовательно, и скорость $\omega(t)$ планшайбы, по которой устанавливалось время $t_{\text{п}}$. При этом учитывалось допустимое значение ускорения планшайбы, которое является ограничением на скорость $\omega(t)$.

Допустимое ускорение $[\varepsilon]$ устанавливалось из расчетов на прочность наиболее «слабых» элементов кинематической цепи - винтов крепления планшайбы к центральной оси. Наибольший момент, передаваемый четырьмя винтами М8×35, определялся исходя из его равенства моменту трения $M_{\text{тр}}$ между планшайбой и центральной опорой. Значение $M_{\text{тр}}$ определяется наибольшим допустимым усилием затяжки указанных винтов.

Из условия $M_{\text{д}} = J\varepsilon \leq M_{\text{тр}} = 112$ Нм определялось

допустимое значение $[\varepsilon]$. Наибольший момент инерции планшайбы с грузами составляет $1,6 \text{ кгм}^2$. Отсюда $[\varepsilon] = 112/1,6 = 70 \text{ рад/с}^2$. Таким образом, установлен критерий работоспособного состояния, который является также ограничением при расчете времени t_n на математической модели, так как $d(\omega(t))_{\max}/dt \leq 70 \text{ рад/с}^2$.

В табл. 1 приведены рассчитанные на модели значения t_n и коэффициента K_ψ в зависимости от z . В соответствии с методикой определения критериев работоспособного состояния рассчитанные на модели значения t_n и T_n должны быть проверены по экспериментальным данным.

Таблица 1. Расчетные и экспериментальные значения времени цикла T_n , поворота t_n и коэффициента K_ψ

Данные	Параметр, размерность	Значение параметра, не более, при z , равном										
		2	3	4	5	8	12	16	24	32	48	96
Полученные математическим моделированием	$t_n, \text{с}$	1,8	1,3	1,0	0,8	0,7	0,5	0,4	0,3	0,3	0,3	0,2
	$T_n, \text{с}$	2,4	1,9	1,6	1,4	1,3	1,1	1,0	0,9	0,9	0,9	0,8
	K_ψ	1,3	1,2	1,1	1,0	0,8	0,8	0,7	0,7	0,4	0,4	0,3
Экспериментальные («сглаженные»)	$t_n, \text{с}$	2,0	1,5	1,2	0,9	0,8	0,6	0,4	0,3	0,4	0,3	0,2
	$T_n, \text{с}$	2,6	2,1	1,8	1,5	1,4	1,2	1,0	0,9	1,0	0,9	0,8

Время t_n связано с $\omega_{\text{ср0}}$ соотношением

$$t_n = \psi / \omega_{\text{ср0}} = 2\pi / (z \omega_{\text{ср0}}). \quad (2)$$

С учетом зависимости средней скорости планшайбы $\omega_{\text{ср0}}$ поворотного стола от момента инерции J подвижных масс [1] $\omega_{\text{ср0}} = K_0 / \sqrt[3]{J}$, где K_0 - коэффициент быстроходности, получим $t_n = 2\pi \sqrt[3]{J} / (z K_0)$. Для величины K_0 по экспериментальным данным определялся доверительный интервал. С тем чтобы исключить влияние на $\omega_{\text{ср0}}$, а следовательно, и на K_0 угла ψ , по экспериментальным данным, рассчитывались значения K_0/K_ψ и доверительный интервал для средних значений $\bar{K}_0 / K_\psi$. $\bar{K}_0 / K_\psi - t\sigma/\sqrt{n} \leq K_0/K_\psi \leq \bar{K}_0 / K_\psi + t\sigma/\sqrt{n}$, где n - объем статистических данных, t - табличное значение коэффициента; σ - среднее квадратическое отклонение значений $\bar{K}_0 / K_\psi$.

Границы доверительного интервала равны $1,37 \leq \bar{K}_0 / K_\psi \leq 1,69$. Анализ зависимости $\omega_{\text{ср0}}/K_0 = f(J)$

показал, что $\omega_{\text{ср0}}^{\max} / K_\psi = \bar{K}_0^{\max} / K_\psi / \sqrt[3]{J}$, где $\bar{K}_0^{\max} / K_\psi$ - границы доверительного интервала. Ве-

личина $\omega_{\text{ср0}}^{\max} / K_\psi$ определяет наибольшее допустимое время поворота $t_n^{\max}$ планшайбы на угол $\pi/3$ радиан. Для произвольного z значение $\omega_{\text{ср0}}^{\min} / K_\psi$ определяется с помощью поправочного коэффициента K_ψ , а время t_n - по формуле

$$t_n^{\max} = 2\pi \sqrt[3]{J} / (z (K_0 / K_\psi)_{\min} K_\psi). \quad (3)$$

В табл. 1 приведены рассчитанные по формуле (3) «сглаженные» значения t_n .

Их сравнение с соответствующими значениями, полученными на математической модели, показывает, что наибольшее рассогласование t_n составляет 14%. Поскольку наибольшая погрешность определения времени t_n по осциллограмме достигает 10%, можно заключить, что установленная на модели закономерность изменения t_n в зависимости от z подтверждается экспериментальными данными.

Таблица 2. Критерии работоспособного состояния поворотных столов с механизмом фиксации из плоских зубчатых колес

Критерии		Допустимые значения
Тип	Наименование, единица измерения	
Основные критерии	Длительность цикла T_n , с, при z , равном	
	2	2,4
	3	1,9
	4	1,6
	6	1,4
	7	1,3
	12	1,1
	16	1,0
	24	0,9
	32	0,9
	48	0,9
	96	0,8
Дополнительный критерий	Допустимое ускорение планшайбы $[\varepsilon]$, рад/с ²	70
	Погрешность δ_ψ углового деления	6"
	Давление p_n в гидросистеме, МПа	2 – 2,5

В табл. 2 приведены критерии, определяющие область работоспособных состояний поворотных столов с механизмом фиксации из плоских зубчатых колес. Значение погрешности углового деления и диапазон допустимых давлений насоса $p_{\text{н0}}$ в гидросистеме указываются в технических условиях. Аналогичным образом по указанной методике определены критерии, указывающие область работоспособных состояний для поворотных столов с механизмом двойной фиксации.

Установленные предварительные значения критериев (время поворота, допустимое ускорение, погрешность углового деления и др.) уточняются по мере поступления информации о свойствах поворотных столов в процессе контрольных и типовых динамических испытаний и диагностирования серийно выпускаемых столов, позволяющих учесть влияние совершенствования технологического про-

цесса изготовления, а также вносимых конструктивных изменений.

После определения области работоспособного состояния узлов с помощью комплекса критериев появляется возможность обоснованно определять и анализировать их дефекты, в частности поворотных столов. Наличие дефекта приводит к невыполнению хотя бы одного из критериев работоспособного состояния.

Накопление и анализ дефектов поворотных столов проводились экспериментально на заводе-изготовителе и на предприятиях, эксплуатирующих поворотные столы. Это позволило изучить влияние реальных производственных условий на формирование дефектов. Некоторые из них обладают свойством маскирования.

Например, в процессе эксплуатации поворотных столов происходит разрегулирование винтов, крепящих компенсатор. В результате он выпадает. Это приводит к тому, что реверсирование планшайбы происходит без предварительного торможения. Возникает жесткий удар в кинематической цепи привода поворота планшайбы, который сопровождается недопустимо большими динамическими нагрузками. При многократном их повторении в процессе работы стола происходит разрушение наклонной шайбы гидромотора как наиболее слабого звена кинематической цепи.

В ряде случаев ремонтные службы ограничиваются только заменой гидромотора и не устраняют действительный источник отказа (выпадение компенсатора). В результате через 1,5-2 месяца очередной гидромотор выходит из строя.

Ряд дефектов возникает на этапе изготовления поворотных столов.

Например, неточное изготовление профиля золотника путевого дросселя вызывает недопустимо большие ускорения планшайбы при торможении и чрезмерно большую длительность процесса торможения. Этот дефект приводит к снижению быстродействия стола и аварийным поломкам, а само наличие дефекта - к изменению осциллограмм скорости, ускорения.

Чувствительны к дефектам также такие параметры, как давления в гидросистеме. Это позволяет использовать указанные параметры в качестве диагностических, определяя по ним характерные амплитудные значения, временные интервалы и связывая их с конкретным дефектом.

Информативным диагностическим признаком для распознавания дефектов механической и гидравлической систем оказалось время разгона планшайбы. Установлено, что недопустимо большие силы трения в редукторе привода вращения планшайбы приводят к уменьшению установившейся скорости вращения и увеличению времени разгона t_p . Повышенное гидравлическое сопротивление в сливной магистрали вызывает уменьшение времени разгона и установившейся скорости.

Экспериментально установлено нормативное

значение $[t_p]$, и на основе сопоставления с ним текущих значений t_p определяется конкретный дефект.

При распознавании дефектов может возникнуть ситуация, когда два диагностических признака одновременно реагируют на один и тот же дефект или два различных дефекта приводят к одинаковому изменению диагностического признака. В такой ситуации необходимо определить наиболее чувствительный диагностический признак для каждого дефекта.

Например, наличие таких дефектов, как недостаточная герметичность дросселя скорости и недопустимо большое количество воздуха в рабочей жидкости, приводят к одновременному увеличению ускорения ϵ_{ϕ} планшайбы при фиксации и скорости планшайбы при реверсе.

С помощью математической модели установлена зависимость диагностических признаков ϵ_{ϕ} и ω_p от структурных параметров K и α . Первый характеризует гидравлическое сопротивление дросселя скорости, а второй - относительный объем воздуха в рабочей жидкости.

Установлено, что ускорение планшайбы ϵ_{ϕ} при фиксации в 1,5-3 раза более чувствительно к изменению параметров K и α . Отсюда следует, что целесообразно для распознавания указанных дефектов использовать диагностический признак ϵ_{ϕ} .

В результате для поворотных столов установлен комплекс диагностических признаков, который включает:

длительность цикла $T_{\text{ц}}$, время поворота планшайбы t_p и установившуюся скорость ω_y планшайбы; ускорения планшайбы при торможении ϵ_t и фиксации ϵ_{ϕ} и перепад давлений Δp на гидромоторе; давление настройки переливного клапана на гидростанции; погрешность δ_{ψ} углового деления; время разгона t_p планшайбы;

На основе расчетов, а также обработки экспериментальных данных для работоспособных поворотных столов установлены допустимые значения указанных диагностических признаков.

1. Алешин А.К., Ковалева Н.Л., Фирсов Г.И. Разработка процедуры оперативного диагностирования мехатронных систем с механизмами циклического действия // *Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении. VI Международная научная конференция.* (Москва, 26-27 ноября 2019 г.). Научные труды. – М.: ИМАШ РАН, 2019. С. 37-39.
2. Алешин А.К., Ковалева Н.Л., Фирсов Г.И. Использование статистических характеристик законов движения в задачах диагностики цикловых механизмов машин // *Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении. III Международная научная конференция.* (Москва, 13-15 мая 2014 г.). Научные труды. М.: Издательский дом «Спектр», 2014. С. 30-32.
3. Алешин А.К., Ковалева Н.Л., Статников И.Н., Фирсов Г.И. Метод планируемого вычислительного эксперимента в задачах определения дефектных состояний механических систем // *Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении. IV Международная научная конференция.* (Москва, 24-26 ноября 2015 г.). Научные труды. М.: Издательский дом «Спектр», 2015. С. 33-35.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПАРЫ ТРЕНИЯ ДЛЯ РАБОТЫ ПЛУНЖЕРНОГО ДОЖИМНОГО КОМПРЕССОРА В АТМОСФЕРЕ ВЕНЕРЫ

В.В. Алисин, А.И. Лукьянов, М.Н. Рошин

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; vva-imash@yandex.ru

В статье рассматриваются вопросы трения циркониевых керамических материалов по альфированному титановому сплаву ВЕ9. Исследуются износостойкость и коэффициент трения в условиях возвратно-поступательного движения при трении без смазки. Обосновывается предположение о возможности применения пары трения для обеспечения работы плунжерного компрессора высокого давления и интервале температур от 460 до 800 С.

В мире заметно усилился интерес к исследованию планет в околосолнечном пространстве. Много внимания уделяется исследованию Венеры, которое доступно только автоматическим космическим аппаратам (КА). Общим недостатком известных проектов КА является отсутствие системы сброса тепла из рабочего отсека в атмосферу Венеры. Автоматический КА проработает столько времени, насколько хватит тепловой защиты и какие допускаемые температуры для электроники. Выполненные в ИМАШе работы в области высокотемпературной трибологии позволяют предложить другую концепцию создания автоматического КА для работы на поверхности Венеры и начать разработку системы сброса теплоты, накапливающейся внутри КА во время работы. Предлагаемый проект включает систему охлаждения КА на поверхности планеты, что позволит значительно увеличить ресурс работы. В систему охлаждения входит: холодильник, работающий по открытому холодильному циклу на газе атмосферы Венеры (CO_2), содержащий дожимной компрессор с параметрами входа состояния атмосферы (93 атм и 460 °С). Основная проблема в обеспечении низкого коэффициента трения и исключения задира плунжерного компрессора высокого давления, предназначенного для работы на поверхности Венеры. Высокая температура на входе в цилиндр (460°С) и особенно на выходе, где по результатам предварительных расчетов ожидается 810 °С, что значительно осложняет достижение положительного результата, но позволяет сформулировать требования к материалам пары трения для изготовления плунжера и втулки. По критериям прочностных свойств, термической стабильности, химической стойкости в условиях высоких температур в среде углекислого газа представляют интерес композиционные материалы на основе диоксида циркония – керамикам и кристаллам, а также углеродные композиты. Выполненные ранее эксперименты [1, 2] по оценке антифрикционных свойств материалов при трении по стали в условиях нагрева до 800 °С показали удовлетворительную теплостойкость пар

трения. Материалы на основе диоксида циркония очень стойки к химическому воздействию среды, но требуют мероприятий по уменьшению коэффициента трения путем модификации поверхности трения плунжера. Более перспективным материалом для изготовления плунжера является высокопрочный титановый сплав ВТ9. Эффективной упрочняющей обработкой титановых сплавов является альфирование, однако фрикционные свойства альфированных титановых сплавов при трении по диоксиду циркония изучены мало.

Цель – исследовать антифрикционные свойства альфированного титана при трении по кристаллам диоксида циркония

Материалы и оборудование.

Эксперименты проведены на наноструктурированных кристаллах диоксида циркония, микролегированных редкоземельными элементами (церием и неодимом), частично стабилизированных оксидом иттрия, химический состав кристаллов ZrO_2 - 2.5 mol % Y_2O_3 +0.2 mol% CeO_2 +0.1 mol % Nd_2O_3 . Контроль изготовлено из альфированного титанового сплава ВТ9 (ГОСТ 22178-76). Для оценки влияния температуры на коэффициент трения опыты проведены на трибометре.

Результаты.

Трибологические испытания проведены машине трения с возвратно-поступательным движением с постоянными параметрами трения при удельной нагрузке 3,3 МПа, средней скорости 4 мм/с. Оценочным показателем износостойкости (ГОСТ 23.001-2004) приняли безразмерный показатель износостойкости G , рассчитываемый по формуле

$$G = L/h,$$

где L - интервал пути трения; h - приращение линейного износа.

В процессе испытаний образцов велась непрерывная запись силы трения. Метрологическое обеспечение экспериментов обеспечено калибровкой измеряемых параметров. Сигнал пропорциональный силе трения $F_{\text{тр}}$ снимается с тензодатчиков,

наклеенных на заземленной балке. Геометрические размеры балки рассчитаны из условия обеспечения линейной зависимости деформации от действующей силы трения. Тензодатчики включены по мостовой схеме. Для повышения точности измерения, в отдельных режимах испытания образцов, используется двухмостовая схема, позволяющая компенсировать вибронпряжения, создаваемые приводом.

На первом этапе проведены сравнительные испытания на трение по керамике ЧСЦ образцов титанового сплава в исходном состоянии и после альфирования. В процессе испытаний образцов велась непрерывная запись силы трения. Метрологическое обеспечение экспериментов обеспечено калибровкой измеряемых параметров. Сигнал пропорциональный силе трения снимается с тензодатчиков, наклеенных на заземленной балке. Геометрические размеры балки рассчитаны из условия обеспечения линейной зависимости деформации от действующей силы трения. Тензодатчики включены по мостовой схеме. Для повышения точности измерения, в отдельных режимах испытания образцов, используется двухмостовая схема, позволяющая компенсировать вибронпряжения, создаваемые приводом. Результаты сравнительных испытаний приведены в (табл. 1).

Таблица 1. Износостойкость образцов и пары трения титан ВТ9 - керамика ЧСЦ: при трении по ВТ9

Образец	Не упрочненный ВТ9, lg G	Альфированный ВТ9, lg G
ВТ9 (пластина)	6,104	9,846
ЧСЦ (куб)	7,173	8,244
ВТ9 - ЧСЦ (пара)	6,068	8,233

Экспериментально установлено, что износостойкость альфированных образцов титанового сплава выше более, чем в 10 раз. Все дальнейшие опыты были проведены с альфированным титановым сплавом. В результате каждого эксперимента методом взвешивания определялся весовой износ, что позволило оценить

износостойкость каждого образца составляющего пару трения и суммарный износ сопряжения. Лучшие результаты показали полированные кристаллы и керамики, трибологические характеристики которых оказались близки. К преимуществам кристаллов ЧСЦ в сравнении с керамикой ЧСЦ следует отнести более высокую трещиностойкость, а к недостатку кристаллов ЧСЦ относится ограниченность линейных размеров (не более 30 мм) и более высокая трудоемкость изготовления.

Исследована износостойкость пары трения титановый сплав – циркониевая керамика при скольжении без смазки при температуре 150 °С на машине трения по схеме диск-палец. С целью более рационального использования рабочей поверхности контробразца испытания проводились на 2-х дорожках трения ($R_{тр}=32$ мм и $R_{тр}=25$ мм), при этом угловая скорость вращения контробразца соответственно корректировалась из соображений обеспечения постоянства скорости относительного скольжения V. Существенной разницы между керамикой и кристаллом ZrO_2 в отношении как антифрикционных, так и износных свойств не выявлено. Имеющиеся небольшие различия между ними в ту или иную сторону укладываются в традиционный статистический разброс экспериментальных данных. Так, если для керамики ZrO_2 коэффициент трения в течение времени эксперимента изменяется от 0.125 до 0.22, а интенсивность изнашивания составляет $I \approx 1 \cdot 10^{-8}$, то для кристалла ZrO_2 они соответственно равны $f = 0.125 \dots 0.23$, а $I = (1.9 \dots 2.5) \cdot 10^{-8}$.

1. Алисин В.В., Рошин М.Н., Лукьянов А.И., Воронцов В.А., Богачев В.А. Маркачев Н.А. Разработка и исследование узлов трения, работающих при высоких температурах, применительно к космическим аппаратам// Вестник НПО им. С.М. Лавочкина. 2019, № 1. С. 61-65
2. Алисин В.В., Рошин М.Н. Влияние температуры на трение углерод-углеродных композитов в среде углекислого газа// Проблемы машиностроения и надежности машин. 2021, №1, с. 108-112

УЛУЧШЕНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ УГЛЕРОДОСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ МОДИФИКАЦИЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ТРЕНИЯ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

В.В. Алисин, М.Н. Рощин, А.И. Лукьянов

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия, roschin50@yandex.ru

В работе рассмотрены высокотемпературные трибологические испытания углеродосодержащего материалов при трении в паре со сталью 40Х13 в температурном диапазоне от +20 до +700 °С в атмосферных условиях. Результаты исследований показали, что модификация поверхности трения материала "Хардкарб-ТП" в парах селена и политетрафторэтилена при трении по стали 40Х13 улучшает антифрикционные свойства поверхности трения. При нагрузке 0,67 МПа и температуре +300 °С коэффициент модифицированной поверхности трения ниже на 23 %, чем у не обработанной, а при температуре +500 °С коэффициент модифицированной поверхности трения ниже на 21 %, чем у не обработанной. Коэффициент трения модифицированной поверхности при нагрузке 0,67 МПа, температуре +500 °С и скорости 0,25 м/с меньше на 25 %, чем не обработанной.

Введение.

Энергетический баланс в узле трения, работающего при высоких температурах, является критерием работоспособности агрегата. Эксплуатация узлов трения при высоких температурах приводит к повышению коэффициента трения поверхностей и износу. Для снижения коэффициента трения в паре необходимо применять новые материалы, работоспособные при высоких температурах [1]. Для повышения антифрикционности поверхности, уменьшения коэффициента трения в условиях высоких температур используют твердые смазочные покрытия [2,3] или же в структуру материала вводят специальные антифрикционные добавки [4]. Для повышения антифрикционности композиционных не металлических материалов в структуру вносят политетрафторэтилен [5]. В качестве антифрикционных добавок используют халькогены [6]. В парах трения при работе при высоких температурах применяют углеродосодержащий композиционных материалов (УУКМ) [7]. Материал УУКМ имеет повышенную стойкость к адгезионному схватыванию и хорошие характеристики прочности. УУКМ, обладая хорошими техническими характеристиками, такими как высокая удельная прочность и температурная стойкость, применяется в узлах трения [8]. Материалы в узлах трения должны обладать хорошей стойкостью к адгезионному схватыванию, низкому коэффициенту трения и малому износу поверхностей [9]. При высоких температурах триботехнические свойства углеродосодержащих материалов исследованы не достаточно [10].

Цель работы – исследовать улучшение трибологических параметров углеродосодержащего материала модификацией поверхности трения при высоких температурах при трении в паре со сталью 40Х13.

Материалы и оборудование.

В исследованиях был использован материал марки "Хардкарб-ТП" и контртело – сталь 40Х13. Исследование трибологических параметров пары трения проводилось на высоко-температурном стенде ВТМТ-1000. Стенд обеспечивает испытание пары образцов по «пальчиковой схеме» в диапазоне температур +20...+700 °С при осевой нагрузке 0,3...1,0 МПа [11]. Испытания пар трения должны обеспечивать условия, которые моделируют работу натурального узла трения. Схема испытаний, реализованная на стенде по «пальчи-ковой схеме», позволяет результаты распростра-нять на другие схемы подшипников скольжения. Температура образцов при испытаниях измерялась термопарой алюмель-хромель с отображением на регистраторе ZET 7120. Угловая скорость при испытании образцов выставлялась дискретно на цикл нагрузки и температуры. В эксперименте участвовало по три образца, размеры которых составляли 10х10х9 мм. Трение образцов марки "Хардкарб-ТП" осуществлялось в паре со сталью 40Х13, линейная скорость выставлялась дискретно и составляла 0,05; 0,16; 0,25 м/с, нагрузка на образцы и температурный режим испытаний устанавливался дискретно, нагрузка составляла 0,67 МПа, температура – +20...+700 °С. При проведении испытаний непрерывно измерялись температура на поверхности трения и момент трения. Испытания проводились в нормальных атмосферных условиях.

Результаты эксперимента.

Для повышения антифрикционных свойств углеродосодержащего материала производилась модификация поверхности трения "Хардкарб-ТП". Материал "Хардкарб-ТП" имеет пористую структуру, поэтому для изменения структуры поверхности трения производили насыщение поверхности трения антифрикционными материалами в защи-тной камере. Обработка проводилась в парах селена и политетрафторэтилена (Se-ПТФЭ) при

температуре 810 °С. Испытания проводились на 2 видах образцов: "Хардкарб-ТП" и "Хардкарб-ТП"+ Se-ПТФЭ. По результатам испытаний при удельной нагрузке 0,67 МПа и скорости: 0,05; 0,16 и 0,25 м/с образцов из материала "Хардкарб-ТП" и "Хардкарб-ТП"+Se-ПТФЭ была установлена зависимость коэффициента трения от температуры, рис. 1.

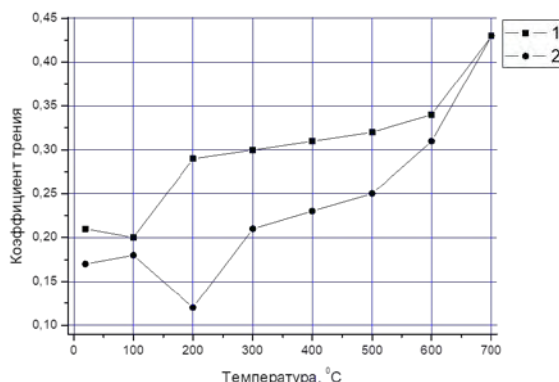


Рис.1. Изменение коэффициента трения от температуры при нагрузке 0,67 МПа и скорости 0,16 м/с материалов: 1- "Хардкарб-ТП", 2- "Хардкарб-ТП"+Se-ПТФЭ.

При увеличении температуры от +200 °С коэффициент трения для материалов "Хардкарб-ТП" и "Хардкарб-ТП"+Se-ПТФЭ растет. Так при температуре +300 °С коэффициент модифицированной поверхности трения ниже на 23 %, чем у не обработанной, при температуре +500 °С коэффициент модифицированной поверхности трения ниже на 21 %, чем у не обработанной. Изменение коэффициента трения от скорости при температуре +500 °С и нагрузке 0,67 МПа для материалов "Хардкарб-ТП" и "Хардкарб-ТП"+Se-ПТФЭ приведено на рис.2.

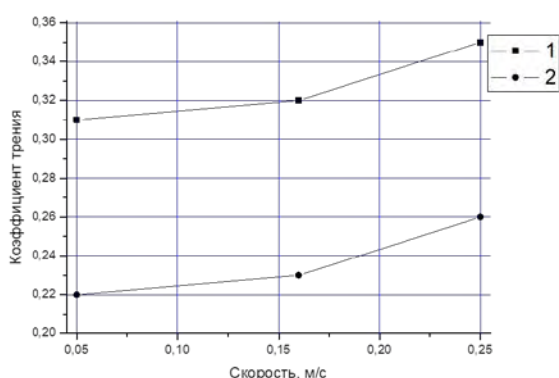


Рис.2. Изменение коэффициента трения от скорости при температуре 500 °C и нагрузке 0,67 МПа материалов: 1- "Хардкарб-ТП"; 2- "Хардкарб-ТП"+Se-ПТФЭ.

Увеличение скорости приводит к увеличению коэффициента трения. Коэффициент трения модифицированной поверхности при температуре +500 °С и скорости 0,25 м/с меньше на 25 %, чем не обработанной. Материал "Хардкарб-ТП" при испытании в атмосфере воздуха испытывает сильное высокотемпературное окисление, которое

вызывает быструю деградацию и эрозию и скорость окисления быстро возрастает с ростом температуры. В присутствии воздуха происходит распад углеродосодержащего материала. Обработка материала "Хардкарб-ТП" в парах Se-ПТФЭ заполняет поры материала антифрикционным составом Se-ПТФЭ, создавая поверхность с улучшенными антифрикционными свойствами, как это и показали проведенные эксперименты. Обработанная поверхность улучшает защиту от воздействия кислорода атмосферы.

Выводы.

Модифицированная поверхность материала "Хардкарб-ТП" в парах селена и политетрафторэтилена при работе в паре со сталью 40Х13 улучшает антифрикционные свойства поверхности трения. При нагрузке 0,67 МПа и температуре +300 °С коэффициент модифицированной поверхности трения ниже на 23 %, чем у не обработанной, при температуре +500 °С коэффициент модифицированной поверхности трения ниже на 21 %, чем у не обработанной. Коэффициент трения модифицированной поверхности при нагрузке 0,67 МПа, температуре +500 °С и скорости 0,25 м/с меньше на 25 %, чем не обработанной.

1. Zlotnikov I I and Shapovalov V M 2019 Improving the antifriction properties of ceramic coatings obtained by the MDO method on aluminum alloys. Friction and wear, vol. 40, No. 5, pp. 469-472.
2. Khrushchov M M, Marchenko E A, Levin I S, Avdyukhina V M, Reilyanu M D, Obraztsova E A and Atamanov M V 2019 Structure and tribological behavior of chromium-carbon coatings obtained by magnetron sputtering. The Physics of Metals and Metallography. Vol. 120. № 2. С. 204-209.
3. Лобова Т.А., Марченко Е.А. Влияние состояния основы на структуру и трибологические характеристики покрытий диселенида молибдена (MoSe_2)// Материаловедение. 2019. № 11. С. 9-13.
4. Al-Saadi D A Y, Pershin V F, Salimov B N and Montaeov S A 2017 Modification of graphite greases graphene nanostructures. Journal of Friction and Wear. T. 38. № 5. С. 355-358.
5. Muravyeva T I, Gainutdinov R V, Morozov A V, Shcherbakova O O, Zagorsky D L and Petrova N N 2017 Investigation of the effect of antifriction modifiers on the surface properties of elastomers based on propylene oxide rubber. Friction and wear. Vol. 38, No. 5, p. 399-410.
6. Xinlei GAO, Denghui LIU, Ze SONG, Kang DAI 2017 Isothermic design of friction-reduction and anti-wear lubricant additives with less sulfur content. Friction. DOI 10.1007/s40544-017-0162-x.
7. Новые материалы. Колл. авторов. Под научной редакцией Ю.С. Карабасова. – М: МИСИС. – 736 с.
8. Chowdhury P, Sehitoglu H and Rateick R 2018 Damage tolerance of carbon-carbon composites in aerospace application. Carbon 126 382-93
9. Liu S, Dong C, Yuan C and Bai X 2019 Tudy of the synergistic effects of fiber orientation, fiber phase and resin phase in a fiber-reinforced composite material on its tribological properties. Wear, v.426-427, pp.1047-1055.
10. Алисин В.В., Рошин М.Н., Лукьянов А.И., Воронцов В.А., Богачев В.А., Маркачев Н.А. Разработка и исследование узлов трения, работающих при высоких температурах, применительно к космическим аппаратам// Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. –2019. № 1.– С. 61-65.
11. Roshchin M N 2020 High-temperature installation for testing composite ceramic materials on the friction and wear behavior. Journal of Physics: Conference Series 1515 042050.

ОКРАШЕННЫЕ НАНОДИСПЕРСНЫЕ ПОРОШКИ ТРИКАЛЬЦИЙФОСФАТА, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫЕ ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ МЕТОДОМ DLP

О.С. Антонова, М.А. Гольдберг, П.В. Проценко, А.А. Коновалов, Д.Р. Хайрутдинова,
Т.О. Оболкина, С.М. Барин

Институт металлургии и материаловедения им. А.А.Байкова РАН, Москва, Россия; antonova@imet.ac.ru

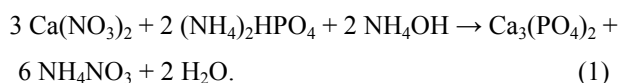
В данной работе были получены окрашенные порошки ТКФ путем замещения катионов кальция на катионы кобальта (II) и марганца (II) со степенями замещения до 1 и 3 мол.%. Синтезированные порошки были окрашены в лиловый и розовый цвета, соответственно. Согласно данным РФА все полученные порошки соответствуют 100 % β-ТКФ (структура виллолита).

Введение

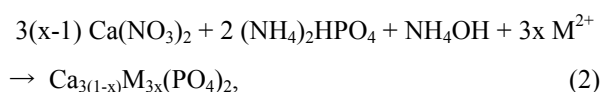
Биологические резорбируемые материалы на основе фосфатов кальция, такие как керамика на основе трикальцийфосфата (ТКФ), получили широкое распространение для восстановления и регенерации костной ткани. Однако, для применения ТКФ керамики в регенеративной медицине необходимо создание «тонких» архитектурных структур с заданной пористостью, размером пор и их взаимосвязанностью, что необходимо для биологических потоков, а также точно заданных форм для полного заполнения костного дефекта. Для получения таких керамических изделий предлагается использовать Digital Light Processing 3D Printing. Согласно [1] окрашенные порошки ZrO₂ лучше отверждаются по сравнению с неокрашенным белым и соответственно достигается большая степень разрешения печати.

Материалы и методы

Синтез трикальцийфосфата (ТКФ) проводили осаждением из водных растворов. В непрерывно перемешиваемый (~ 300-500 об/мин) водный раствор нитрата кальция (Ca(NO₃)₂·4H₂O) капельно вводили раствор гидрофосфата аммония ((NH₄)₂HPO₄). В качестве осадителя использовали аммиак и гидрофосфат аммония. Уровень значений pH в процессе синтеза поддерживали в диапазоне 6,8-7,2 с помощью водного раствора аммиака и уксусной кислоты. Расчет реагентов проводили в соответствии с реакцией:



Замещенные формы ТКФ (М-ТКФ) получали аналогично предыдущему способу с введением в раствор нитрата кальция солей соответствующих катионов (табл. 1). Расчет количества прекурсоров проводился согласно реакции:



где M = Co, Mn. Расчетные степени замещения ионов Ca²⁺ на ионы M²⁺ составляли 1 и 3 мол.% (соответственно, предполагаемые химические формулы: Ca_{2,97}M_{0,03}(PO₄)₂ и Ca_{2,91}M_{0,09}(PO₄)₂).

Таблица 1. Прекурсоры, вводимых катионов

Катион	Прекурсор
Co ²⁺	CoCl ₂ ·6H ₂ O
Mn ²⁺	Mn(CH ₃ COO) ₂ ·6H ₂ O

После проведения синтеза полученный осадок промывали дистиллированной водой и декантировали, затем фильтровали на воронке Бюхнера и сушили при температуре 60-80 °С. После сушки полученные порошки прокаливали при температурах 400, 600, 900 °С в течение 3 часов. Прокалку осуществляли на воздухе.

После термообработки при 900 °С порошки были изучены методом рентгенофазового анализа (РФА) на дифрактометре Shimadzu XRD-6000 (Shimadzu, Япония), съемка проводилась в монохроматизированном CuKα-излучении с длиной волны λ = 1,54184 Å и шагом 0,02 °, с использованием базы данных JCPDS PCPDFWIN. Удельную площадь поверхности порошков, не подвергавшихся прокалке и прокаленных при 600 °С, измеряли методом низкотемпературной адсорбции азота (метод БЭТ) на анализаторе TriStar (Micromeritics, США). ИК-Фурье спектроскопию проводили на приборе Avatar 330FT-IR (Thermo Nicolet, Англия). Спектры UV-vis диффузного отражения регистрировали в диапазоне 400–730 нм с шагом 10 нм на микроспектрометре (Eye-One Pro 2, X-Rite, США) на всех порошках, как непрокаленных, так и прокаленных при всех температурах. Измеренные спектры UV-vis преобразованы в функцию Кубелки-Мунка F(R) согласно уравнению:

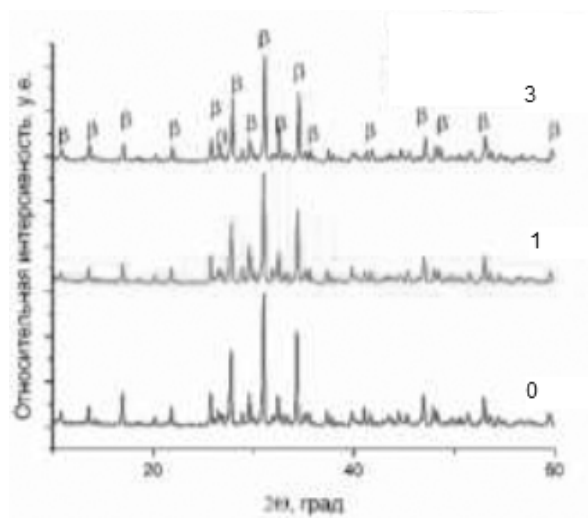
$$F(R) = (1-R)^2/2R, \quad (3)$$

где R – коэффициент диффузного отражения.

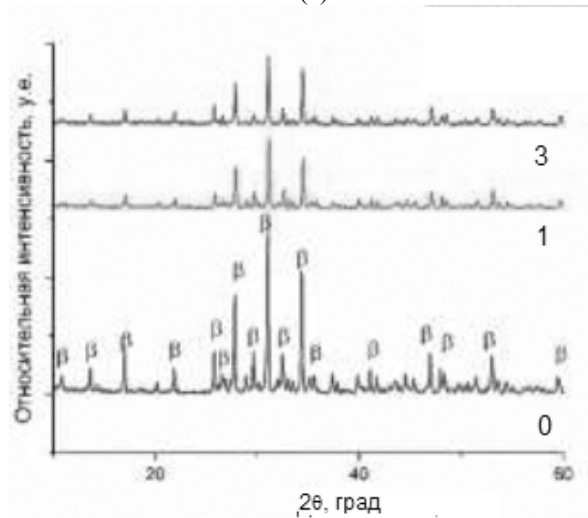
Результаты и их обсуждение

Согласно данным РФА (рис. 1) во всех полученных порошках наблюдается одна фаза – β-ТКФ. Введение замещающих катионов приводит к уменьшению интенсивности пиков и соответственно уменьшению степени кристалличности материалов или повышением дисперсности частиц порошков. Причем увеличение степени замещения способствует снижению интенсивности рефлексов. В случае замещенных ТКФ (CoТКФ, MnТКФ) наблюдается незначительное смещение пиков в сторону больших углов относительно дифрактограммы чистого ТКФ,

что подтверждает вхождение катионов кобальта (II) и марганца (II) в структуру ТКФ и образование твердых растворов замещения.



(а)



(б)

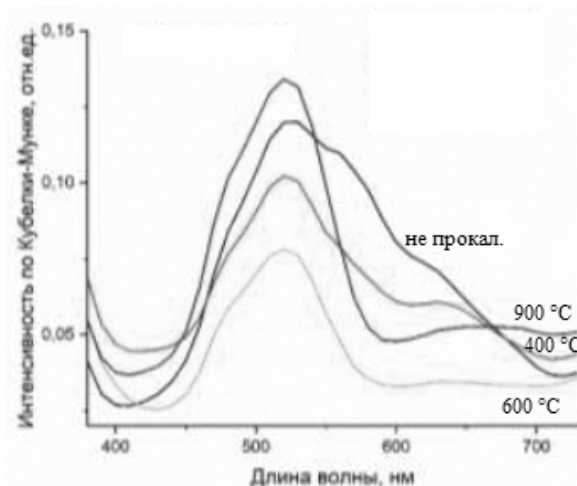
Рис. 1. Дифрактограммы СоТКФ (а), МпТКФ (б), где 0, 1, 3 – степени замещения, β – пики, принадлежащие β-ТКФ

Исследования ИК-спектроскопии показали, что для всех исследованных порошковых материалов наблюдаются типичные колебания с характерными для фосфат-групп полосами поглощения при 573 и 600 см^{-1} , и в диапазоне 960-1188 см^{-1} .

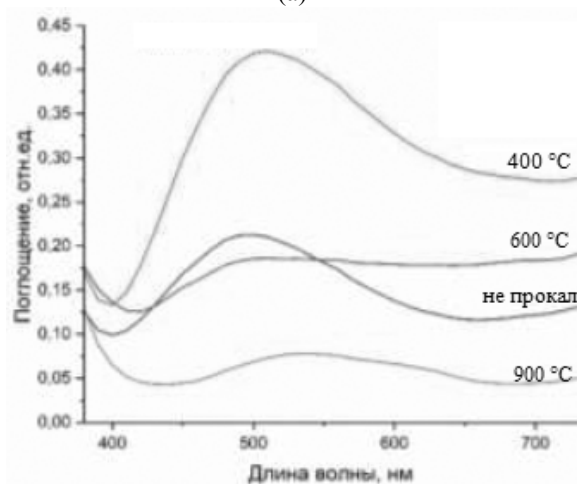
Согласно данным ЭСДО спектроскопии для СоТКФ интенсивность окраски сначала снижается с увеличением температуры термообработки до 600 $^{\circ}\text{C}$, а затем достигает максимума при 900 $^{\circ}\text{C}$. При этом пики при 477 и 530 нм сохраняются для всех температур обработки. Для образцов, не подвергавшихся прокатке и после 400 $^{\circ}\text{C}$ термообработки также наблюдаются пики при 570 и 630 нм, относящиеся к побочным продуктам реакции. При дальнейшем нагревании они разлагаются.

Для МпТКФ изменение интенсивности окраски происходит иначе. При нагревании до 400 $^{\circ}\text{C}$ ин-

тенсивности окраски начинает расти. Дальнейшее повышение температуры приводит к последовательному уменьшению интенсивности. Одновременно увеличение температуры прокатки способствует сдвигу пика от 490 нм для непрокатанного порошка до 545 нм для термообработанного при 900 $^{\circ}\text{C}$. Эти данные подтверждаются визуальными наблюдениями. Так, Мп-замещенный ТКФ при повышении температуры изменяет окраску от насыщенно розового (порошок не прокаливали) до кремового (порошок обрабатывали при 900 $^{\circ}\text{C}$) через бледно-фиолетовый (при 600 $^{\circ}\text{C}$). Со-замещенные ТКФ меняют только интенсивность окраски, оставаясь лилового цвета.



(а)



(б)

Рис. 2. Спектры ЭСДО СоТКФ 3 мол.% (а), МпТКФ 3 мол.% (б)

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ № 18-29-11052.

- Li, Yanhui, et al. "Cure behavior of colorful ZrO_2 suspensions during Digital light processing (DLP) based stereolithography process." // J. Eur. Cer. Soc. 2019. V. 39. I. 15. P 4921-4927.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОЛГОВРЕМЕННЫХ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ СТЕКЛОКОМПОЗИТНЫХ ТРУБ ДЛЯ РАСЧЕТА СРОКА ЭКСПЛУАТАЦИИ

В.А. Антошин¹, Д.А. Мельников¹, С.В. Иванов², А.Ю. Албагачиев¹

¹Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; fast-trust@yandex.ru.

²Общество с ограниченной ответственностью «Новые Трубные Технологии», Москва, Россия; ivanov@ntt.su.

В работе определены прочностные и деформационные характеристики стеклокомпозитных труб на базе испытаний в течение 10 000 часов. По результатам испытаний методом регрессионного анализа были рассчитаны долговременные прочностные и деформационные характеристики стеклокомпозитных труб со сроком эксплуатации не менее 50 лет.

Цель

Провести исследования по определению долговременных упруго-прочностных характеристик стеклокомпозитных труб в условиях эксплуатационного воздействия (воды, вертикальной нагрузки).

Материалы и методы

В ходе работ были выполнены испытания для определения начальной удельной кольцевой жесткости по ГОСТ Р 55071-2012 (метод Б), определения долговременной удельной кольцевой жесткости при релаксации и расчёта коэффициента релаксации при воздействии влаги в течение 10 000 часов по ГОСТ Р 57008-2016, определения долговременной удельной кольцевой жесткости при ползучести и коэффициента ползучести при воздействии влаги в течение 10 000 часов по ГОСТ Р 57006-2016 (ГОСТ 34643-2020), определения долговременной предельной деформации изгиба и долговременной предельной относительной кольцевой деформации при воздействии влаги по ГОСТ Р 57030-2016 (ГОСТ 34647-2020), определения химической стойкости внутренней поверхности в условиях нагружения по ГОСТ Р 55077-2012 (ГОСТ 34644-2020). Обработка результатов испытаний проведена методом регрессионного анализа по ГОСТ Р 57949-2017 (метод А).

Образцами являлись стеклокомпозитные трубы, изготовленные методом непрерывной намотки. Общий вид образцов приведен на рис.1.

Сырье: ненасыщенные полиэфирные смолы (UP), кварцевый песок, стеклоровинги [1].



Рис. 1. Общий вид образцов при испытаниях.

Для испытаний были разработаны стенды следующей конструкции (рис.2):

1. Рама нагружающая;
2. Нагружающие площадки из гидростойкого материала;

3. Бруски для нагружающих площадок;
4. Стержни с резьбой;
5. Гайки с резьбой;
6. Емкость с водой Глубоководный длинноволновой лоток НОЦ «Гидротехника»;
7. Датчик силы цифровой до 50 кН ТЕНЗО-М М50-С3 с погрешностью не более $\pm 1\%$ (степень влагозащиты IP68).



Рис.2. Схема стенда для испытаний.

Показания тензодатчика регистрируются при помощи портативного цифрового регистратора ТС-32К, оснащенного интервальным таймером, встроенной памятью и интерфейсом для управления с компьютера, позволяющего собирать и передавать данные с 20 различных каналов.

Для измерения кольцевой деформации с погрешностью не более $\pm 1\%$ используются цифровые индикаторы перемещений Micron ИЦ 0-12.5 0,01.

Результаты и их обсуждение

Начальная удельная кольцевая жесткость (S_0 , Н/м²) определялась по ГОСТ Р 55071-2012 (метод Б).

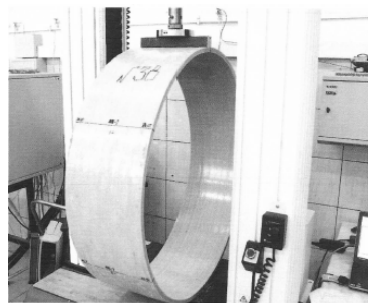


Рис.3. Фото образца при определении начальной кольцевой жесткости.

Образец представлял собой отрезок трубы. Длина образца составляла (300 ± 15) мм.

Концы образца были гладкими, ровными и перпендикулярными к оси трубы, без заусенцев и

кромки с зазубринами.

Вдоль образца по наружной поверхности трубы с шагом в 60° по окружности были нанесены прямые линии, выполняющие роль опорных линий.

Образец устанавливали в испытательной машине таким образом, чтобы противоположные опорные линии контактировали с нагружающими площадками. Контакт между образцом и нагружающими площадками был одинаковый по всей линии контакта, нагружающие площадки не были перекошены.

К образцу с постоянной скоростью прикладывали сжимающую нагрузку до достижения удельной кольцевой деформации в $(3,0 \pm 0,5) \%$ за (60 ± 10) с. Полученную удельную кольцевую деформацию поддерживали постоянной в течение 2 минут, по прошествии этого времени определяли и фиксировали сжимающую нагрузку и кольцевую деформацию.

Начальная удельная кольцевая жесткость S_0 , Н/м², определялась по формуле:

$$S_0 = \frac{f \cdot F}{L \cdot y}, \quad (1)$$

где f – коэффициент деформации;

F – сжимающая нагрузка, Н;

L – длина образца, м;

y – деформация трубы, равная разности внутренних диаметров трубы до приложения нагрузки и после приложения нагрузки, м.

Коэффициент деформации трубы вычислялся по формуле:

$$f = \left(1860 + \frac{2500 \cdot y}{d_{cp}} \right) \cdot 10^{-5}. \quad (2)$$

Кольцевая деформация трубы вычислялась по формуле:

$$y = d_{в0} - d_{в1}, \quad (3)$$

где $d_{в0}$ – внутренний диаметр образца до приложения нагрузки, м;

$d_{в1}$ – внутренний диаметр образца после приложения нагрузки, м.

Определение долговременной удельной кольцевой жесткости при релаксации и расчёт коэффициента релаксации при воздействии влаги в течение 10 000 часов.

Сущность метода заключается в нагружении образца для испытаний, расположенного горизонтально и погруженного в воду, при заданной температуре, диаметральной сжимающей нагрузкой на время, в течение которого нагрузка остаётся постоянной. Кольцевую деформацию измеряют через заданные промежутки времени до достижения 10000 ч. По результатам испытаний определяют долговременную удельную кольцевую жесткость при ползучести и коэффициент ползучести при воздействии влаги.

Оценка результатов испытаний и определение долговременной удельной кольцевой жесткости при релаксации и коэффициента релаксации при воздействии влаги производится методом регрессионного анализа полученных за рассматриваемый период времени данных об изменении долговременной нагрузки F , представленных на графике в логарифмических координатах $\lg(F) = f(\lg(t))$.

Уравнение регрессионной прямой, описывающей изменение долговременной нагрузки с течением времени для испытанных образцов, позволяет прогнозировать изменение кольцевой жесткости за расчётный интервал времени X лет и определять значение долговременной удельной кольцевой жесткости $S_{x,relax,wet}$ при релаксации и воздействии влаги, используя экспериментальные данные о начальной удельной кольцевой жесткости S_0 и рассчитанный по ГОСТ Р 57008-2016 коэффициент релаксации при воздействии влаги $\alpha_{x,relax,wet}$.

Полученное экспериментальным путём уравнение регрессионной прямой справедливо для релаксации при воздействии влаги с уровнями расчётных деформаций ϵ_p , эквивалентными заданным на образцах при проведении испытаний (рис. 4).

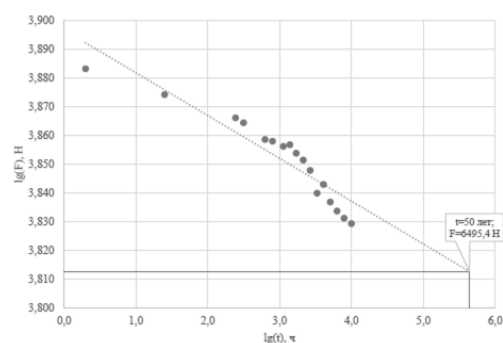


Рис.4. Зависимость нагрузки от времени релаксации

Показатели долговременной удельной кольцевой жесткости при релаксации $S_{x,relax,wet}$ и коэффициента релаксации при воздействии влаги $\alpha_{x,relax,wet}$ в соответствии с ГОСТ Р 57008-2016 определяются на базе не менее 10000 часов по методу ГОСТ Р 55077-2012, за расчётный срок службы 50 лет.

Определение долговременной удельной кольцевой жесткости при ползучести и расчёт коэффициента ползучести при воздействии влаги в течение 10000 часов.

Сущность метода заключается в нагружении образца для испытаний, расположенного горизонтально и погруженного в воду, при заданной температуре, диаметральной сжимающей нагрузкой на время, в течение которого нагрузка остаётся постоянной.

Кольцевую деформацию измеряется через заданные промежутки времени до достижения 10000 ч. По результатам испытаний определяют долговременную удельную кольцевую жесткость при ползучести и коэффициент ползучести при воздействии влаги. Для испытания используют два образца, если иное не установлено в нормативном документе. Долговременная удельная кольцевая жесткость при ползучести и коэффициент ползучести при воздействии влаги являются средним арифметическим, полученным для двух образцов.

Оценка результатов испытаний и определение долговременной удельной кольцевой жесткости при ползучести и коэффициента ползучести при воздействии влаги производится методом регрессионного анализа полученных за рассматриваемый период

времени t данных об изменении долговременной деформации y , представленных на графике в логарифмических координатах $\lg(y) = f(\lg(t))$. Уравнение регрессионной прямой, описывающей изменение долговременной деформации с течением времени для испытанных образцов, позволяет прогнозировать изменение кольцевой жесткости за расчетный интервал времени X , лет и определять значение долговременной удельной кольцевой жесткости $S_{x,creep,wet}$ при ползучести и воздействии влаги, используя экспериментальные данные о начальной удельной кольцевой жесткости S_0 и рассчитанный по ГОСТ Р 57006-2016 (ГОСТ 34643-2020) коэффициент ползучести при воздействии влаги $\alpha_{x,creep,wet}$. Полученное экспериментальным путём уравнение регрессионной прямой справедливо для ползучести при воздействии влаги с уровнями сжимающих нагрузок F , эквивалентными заданным на образцах при проведении испытаний (рис.5).

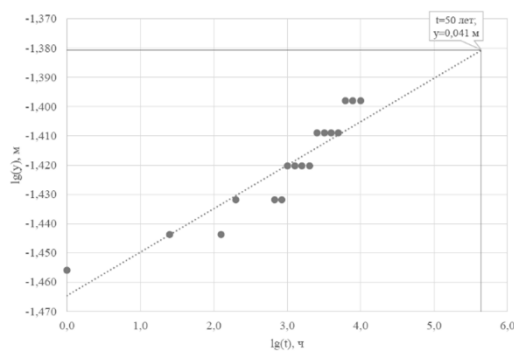


Рис.5. Зависимость кольцевой деформации от времени ползучести

Показатели долговременной удельной кольцевой жесткости при ползучести $S_{x,creep,wet}$ и коэффициента ползучести при воздействии влаги $\alpha_{x,creep,wet}$ в соответствии с ГОСТ Р 57008-2016 определяются на базе не менее 10000 часов по методу А ГОСТ Р 55077-2012 (ГОСТ 34644-2020), за расчетный срок службы 50 лет.

Определение долговременной предельной деформации изгиба и долговременной предельной кольцевой деформации при воздействии влаги.

Сущность метода заключается в нагружении образца для испытаний, расположенного горизонтально и погруженного в воду, при заданной температуре, вертикальной сжимающей нагрузкой на время, в течение которого приложенная нагрузка остается постоянной. Кольцевую деформацию в процессе нагружения измеряют через определенные (заданные) промежутки времени до момента разрушения образца для испытаний. По результатам испытаний определяют долговременную предельную деформацию изгиба и долговременную предельную деформацию при воздействии влаги.

Оценка результатов испытаний и определение долговременной предельной деформации изгиба при воздействии влаги и долговременной предельной кольцевой деформации при воздействии влаги про-

изводится методом регрессионного анализа полученных за рассматриваемый период данных о времени до разрушения образца t при заданной предельной деформации изгиба при воздействии влаги ϵ для каждого образца, представленных на графике в логарифмических координатах $\lg(\epsilon) = f(\lg(t))$. Формулу регрессионной прямой определяют в соответствии с Приложением А ГОСТ Р 55077-2012 (ГОСТ 34644-2020).

Уравнение регрессионной прямой, описывающей зависимость времени до разрушения образца t от уровня деформаций ϵ при воздействии влаги, позволяет определять долговременную предельную деформацию изгиба ϵ при воздействии влаги за X , лет (рис. 6).

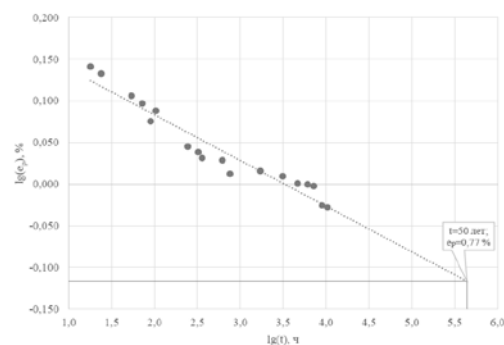


Рис.6. Зависимость времени разрушения образца от уровня деформации

Полученное экспериментальным путём уравнение регрессионной прямой может применяться для оценки долговременной предельной деформации изгиба испытанных образцов продукции при воздействии влаги (температура воды 23 ± 2 °С, значение рН воды (7 ± 2)).

В результате проведения долговременных испытаний (коэффициенты определялись из расчета 50 лет эксплуатации) по определению коэффициента релаксации при воздействии влаги ($\alpha_{50,relax,wet}$), коэффициента ползучести при воздействии влаги ($\alpha_{50,creep,wet}$), долговременной предельной деформации изгиба при воздействии влаги ($\epsilon_{п,вл,50}$) и долговременной предельной деформации изгиба при воздействии химической среды ($\epsilon_{п,хим,50}$) для образцов стеклокомпозитных труб ООО «НТТ», изготовитель ООО «НТТ-Пересвет», установлены следующие значения (табл.1).

Таблица 1. Результаты долговременных испытаний

№ п/п	Тип образца (маркировка)	$\alpha_{50,relax,wet}$	$\alpha_{50,creep,wet}$	$\epsilon_{п,вл,50}, \%$
1	Dy 1200-0,6-5000	0,92	0,85	0,77
2	Dy 1400-0,6-5000	0,96	0,81	0,75
3	Dy 1500-0,6-10000	0,92	0,89	0,82

1. Мельников Д.А., Иванов С.В., Антошин В.А. Стеклокомпозитные трубы и изделия из них: заданное сочетание эксплуатационных и технологических свойств // Наилучшие доступные технологии водоснабжения и водоотведения. – 2020. – № 6. – С. 22-23.

СВАРКА ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ МЕДИ

В.В. Атрощенко, А.С. Селиванов, В.С. Лобачев, Ю.В. Логачев

ООО «Аттестационный центр СваркаТехСервис», Уфа, Россия; selivanov@naks-rb.ru

В данной статье рассматривается проблема сварки меди. На основании рекомендаций, приведенных в иностранной литературе, сконструирован инструмент для сварки трением с перемешиванием и выбраны режимы для меди толщиной 5 мм. При проведении экспериментов обнаружен заглаженный непровар, устраненный путем изменения конструкции инструмента и режимов сварки.

Медь, благодаря высокой электро- и теплопроводности, сочетанию прочности и пластичности, а также коррозионной стойкости, широко используется при изготовлении токоведущих деталей, электро-технических шин силового оборудования и разнообразных изделий в различных отраслях промышленности: атомной, электронной, электроэнергетической, нефтегазовой, химической и других.

Медь и медные сплавы могут быть сварены практически всеми методами сварки, однако сварка плавлением осложнена специфическими свойствами меди:

1. Активное поглощение медью кислорода и водорода в нагретом состоянии повышает склонность к образованию пор и трещин и требует качественной предварительной подготовки заготовок и сварочных материалов, тщательной послойной зачистки и обезжиривания, надежной защиты шва от окисления в процессе сварки.
2. Теплопроводность меди одна из самых высоких среди металлических материалов (почти в 2 раза превышающей теплопроводность алюминия и в 5 раз теплопроводность стали). Во время сварки необходимо применение концентрированных источников нагрева и предварительного подогрева (в зависимости от толщины рекомендуется подогрев от 200 до 800 °С).
3. Крупнозернистая столбчатая структура сварных швов повышает склонность к образованию кристаллизационных трещин.
4. Примеси, присутствующие в меди образуют с ней легкоплавкие эвтектики, скапливающиеся на границах кристаллитов и снижающих их прочность.
5. Повышенная жидкотекучесть меди существенно затрудняет сварку плавлением, которую рекомендуется производить в нижнем положении с формированием корня шва на подкладке.

Одним из способов решения проблем, возникающих при сварке меди, является сварка давлением в твердой фазе, без нагрева до температуры плавления.

Сварка трением с перемешиванием (СТП) является одним из разновидностей сварки давлением. От других видов сварки давлением, сварка трением отличается способом нагрева деталей или, условиями введения тепла в свариваемые детали.

Цель работы

Целью работы является оценка возможности применения СТП для медных шин, используемых в

качестве токоподводов силового оборудования.

Материалы и методы исследований

Схема процесса СТП представлена на рис. 1. Основными параметрами процесса являются: n — частота вращения инструмента, $V_{св}$ — скорость сварки, α — угол наклона инструмента, P_z — осевое усилие, l — глубина погружения инструмента [1].

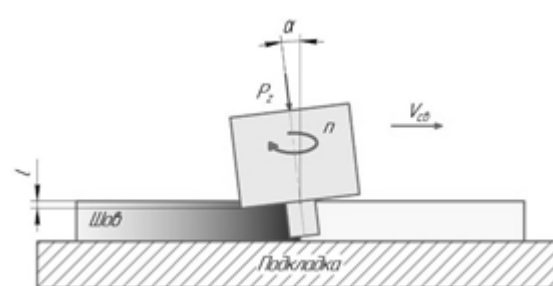


Рис. 1. Схема процесса СТП

В отличие от традиционных способов сварки трением, когда вращается одна из свариваемых деталей, при СТП сварка производится вращающимся инструментом. В наиболее простом исполнении сварочный инструмент представляет собой цилиндр с плоским заплечиком диаметром D и фиксированным наконечником — пином, меньшего диаметра d_{π} и длиной l_{π} , как показано на рис. 2.

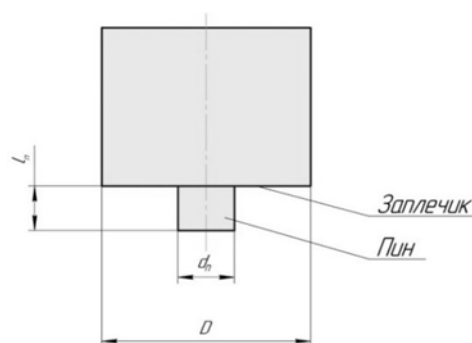


Рис. 2. Инструмент для СТП

На основании данных, полученных в ходе анализа известных публикаций [2-4] сконструирован инструмент для сварки трением с перемешиванием листов из меди толщиной 5,0 мм. Сварочный инструмент представляет собой сборную конструкцию -

корпус выполнен из легированной стали марки 20Х13 с диаметром заплечика 25 мм, пин – цилиндрической формы, из материала на основе вольфрама.

Режимы сварки выбирались на основании данных

литературного обзора [5,6,7].

С использованием данного инструмента получены образцы из бескислородной меди толщиной 5 мм на стальной подкладке. Режимы сварки представлены в таблице 1.

Таблица 1. Режимы сварки медных пластин толщиной 5 мм

№ Образца	Частота вращения инструмента, об/мин	Скорость сварки мм/мин	Угол наклона инструмента	Заглубление, мм	Диаметр заплечика, мм
55	900	80	1°	0,2	25
56	900	40	2°	0,23	25
57	900	40	3°	0,25	25
87	900	40	3°	0,15	30
105	1120	25	1°	0,37	20

С целью выявления внутренних дефектов, полученные образцы исследовались с помощью цифровой рентгенографии и металлографии.

Результаты и их обсуждение

В ходе проведения рентгенографического контроля на образцах 55, 56, 57 (рис. 3) выявлен дефект в виде заглаженного непровара по всей длине шва (рис. 4). На рис. 5 представлены макрошлифы образцов.

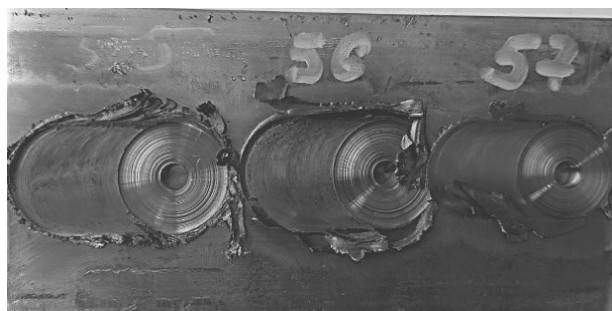


Рис. 3. Образцы СТП №55, 56, 57

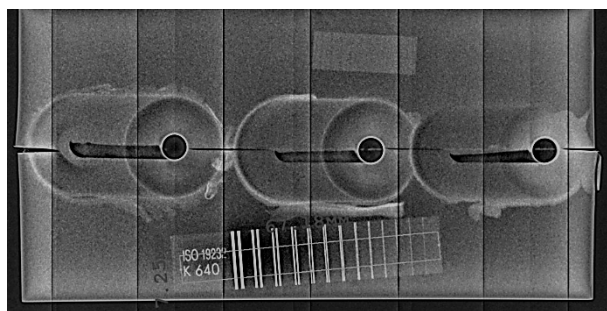


Рис. 4. Рентгеновский снимок образцов №55, 56, 57

Заглаженный непровар является распространенным дефектом швов при СТП, проявляющийся при недостаточном тепловложении в свариваемые заготовки. Для увеличения тепловложения диаметр заплечика увеличен до 30 мм. На рис. 6 представлены результаты сварки образца 87. Как видно, заглаженный непровар заметно уменьшился в размерах.

С увеличением частоты вращения инструмента и уменьшением скорости сварки, а также с увеличением площади контакта заплечика и свариваемых заготовок тепловложение заметно увеличивается, даже с уменьшением диаметра заплечика. Результаты сварки образца 105 показали, что при использо-

ванием сочетания параметров режима (табл. 1) и диаметре заплечика 20 мм, заглаженный непровар не выявляется (рис. 7).

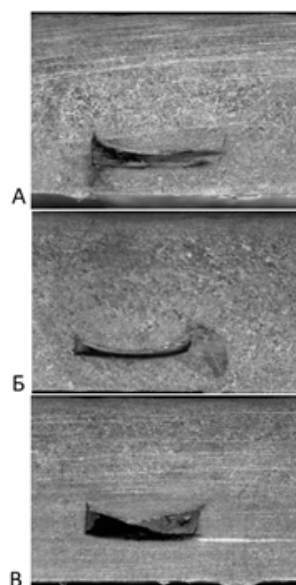


Рис. 5. Макрошлифы образцов:
А - №55, Б - №56, В - №57

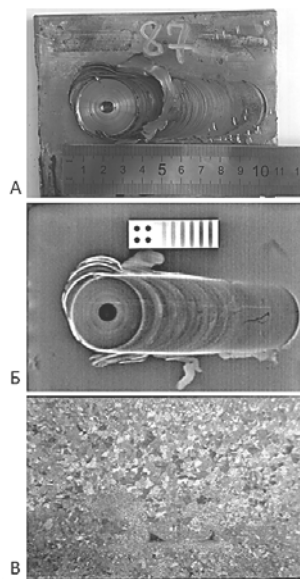


Рис 6. Образец №87 (А), рентгенографический снимок (Б), микрошлиф (В)

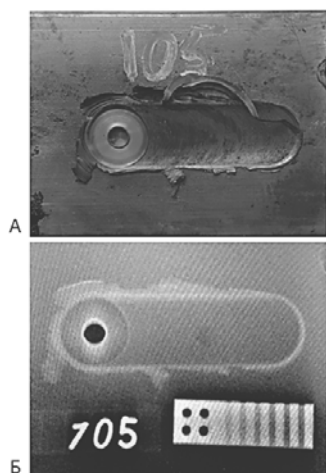


Рис. 7. Образец №105 (А), рентгенографический снимок (Б)

Выводы

1. Рекомендации, приведенные в зарубежной литературе не дают корректного представления о значениях параметров режима сварки и конструкции применяемого инструмента, что не позволяет осуществить выбор режимов сварки, обеспечивающих формирование бездефектных сварных соединений по известным данным.
2. Установлено, что конструкция инструмента имеет ключевое значение для формирования сварного соединения. При разработке инструмента наряду с диаметром заплечика и формой

пина, необходимо учитывать угол наклона и глубину погружения в свариваемые заготовки.

3. Бездефектное сварное соединение получено при следующих режимах сварки: частота вращения инструмента – 1120 об/мин; скорость сварки – 25 мм/мин, глубина погружения инструмента – 0,37 мм с углом наклона 1 градус. Диаметр заплечика инструмента 20 мм, форма пина – цилиндрическая.

1. Y. N. Zhang, X. Cao, S. Laroseand, P. Wanjara. Review of tools for friction stir welding and Processing // University of Cambridge. – 2012. - № 3. – С. 250-261.
2. H. J. Liu, J. J. Shen, Y. X. Huang, L. Y. Kuang, C. Liu, C. Li. Effect of tool rotation rate on microstructure and mechanical properties of friction stir welded copper // Science and Technology of Welding and Joining. 2009. T 14 no 6.
3. J.J. Shen, H.J. Liu, F. Cui. Effect of welding speed on microstructure and mechanical properties of friction stir welded copper // Materials and Design. 2010. № 31. pp. 3937–3942.
4. H. Pashazadeh, J. Teimournezhad, A. Masoumi. Numerical investigation on the mechanical, thermal, metallurgical and material flow characteristics in friction stir welding of copper sheets with experimental verification // Materials and Design. 2014. № 55. pp. 619–632.
5. H. Farrokhi, A. Heidarzadeh, T. Saeid. Frictions stir welding of copper under different welding parameters and media // Science and Technology of Welding and Joining. 2013. T. 18. № 8. pp. 697-702.
6. H. Khodaverdizadeh, A. Mahmoudi, A. Heidarzadeh, E. Nazari. Effect of friction stir welding (FSW) parameters on strain hardening behavior of pure copper joints // Materials and Design. 2012. T. 35. pp. 330–334.
7. Pankaj Sahlot, Kaushal Jha, G.K.Dey, Amit Arora. «Quantitative wear analysis of H13 steel tool during friction stir welding of Cu-0.8%Cr-0.1%Zr alloy». Wear. Volumes 378–379, 15 May 2017, Pages 82-89.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПОИСКА ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А. Барденхаген¹, М.А. Печейкина², Д.Л. Раков³, В.Т. Тодоров¹

¹Аэрокосмический институт Берлинского технического университета, Берлин, Германия;

²Московский энергетический институт (Национальный исследовательский университет), Москва, Россия

³Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; rdl@mail.ru

В работе рассмотрены результаты исследований по использованию морфологических подходов для поиска и анализа инновационных технических систем и решений. Современные процессы предэскизного проектирования позволяют рассматривать ограниченное число технических решений, зачастую не рассматривая более эффективные решения. Значительно более широкого генерирования и исследования возможных решений можно достичь путем применения морфологического подхода. Кратко рассматривается методика и примеры применения подхода.

В настоящее время большое внимание уделяется разработке методов и программного обеспечения для компьютерной поддержки инноваций (Computer Aided Innovation) [1]. Данные методы применяются для генерации, сбора, оценки, классификации и анализа идей и технических решений. К этим методам можно отнести процедуры морфологического анализа. Эти формализованные методы структурирования проблем позволяют изучить группу возможных решений для многомерных, многокритериальных и не поддающихся количественной оценке задач [2-4]. После декомпозиции исследуемой системы на признаки и элементы при помощи комбинаторики генерируется множество вариантов. Все возможные комбинации этих вариантов представляют собой пространство решения задачи.

Проектирование устройства (системы, процесса) состоит из двух основных задач: определение (а) самой структуры (структурный синтез) и (б) диапазона параметров для синтезированной структуры (параметрический синтез или параметрическая оптимизация). Задачи параметрического синтеза обычно сводятся к определению решений, удовлетворяющих метрическим критериям, что делает их формально разрешимыми. Задача структурного синтеза совершенно иная, поскольку ее нельзя в общем случае отнести к классу формально разрешимых задач. Результатом структурного синтеза является выбор рациональной структуры объекта. Структурный синтез требует работы с неопределенными структурными связями, не метрическими атрибутами элементов структуры и критериями качества. Целевая функция структурного синтеза не соответствует основным требованиям обычных методов оптимизации, поскольку она может быть прерывной, записываться в операторной форме, не основываться на аналитическом выражении, недифференцируемой, не унимодальной, не сепарабельной или не аддитивной [5].

Основная трудность концептуального проектирования инновационных систем заключается в значительной неопределенности информации. При этом психологические причины также играют опреде-

ленную роль в процессе поиска. Так, разработчик способен работать одновременно с пятью-семью изменяемыми параметрами. Кроме того, разработчику присуще желание улучшить проектное решение путем одновременного варьирования одного параметра при фиксированных значениях других. Но размерность задач при поиске возможных решений может составлять десятки и сотни различных варьируемых параметров.

Один из выводов состоит в том, что необходимо принципиально отказаться от поиска строго оптимальных вариантов. Целесообразно сосредоточиться на синтезе некоторого числа рациональных вариантов, близких к теоретически оптимальным по значениям критериев. Это обусловлено тем, что неопределенность заключается, в том числе и при выборе множества критериев, а также при их ранжировании методами экспертных оценок. Тем самым следует рассматривать некоторое множество сгенерированных вариантов.

Морфологический анализ был разработан как метод структурирования проблем для поиска полного набора возможных решений многомерных, многокритериальных, не поддающихся количественной оценке проблем в условиях неопределенности.

Для достижения этой цели экспертами производится декомпозиция, синтезируется морфологическая матрица, производится перекрестная оценка, определяются невозможные сочетания и, наконец, формируется пространство решений (Рис.1).

При декомпозиции исследуемый объект разделяется на функциональные, субфункциональные или другие характерные признаки. Их количество определяет размерность задачи. Затем каждому признаку сопоставляется некоторое множество элементов. Элементы одного и того же признака не могут быть объединены, что означает, что потенциальное решение задачи может включать только один элемент по каждому признаку. Таким образом, формируется морфологическая матрица. В матрице расположено морфологическое множество вариантов. Некоторые и из вариантов уже существуют и их можно опреде-

лить как множество известных вариантов. Множество формируется их описания патентов, обработки литературных источников и конструкторской документации. Данное множество необходимо для определения существующего уровня техники и позволяет в дальнейшем оценить новизну решений.

		Элементы					
		x_1	x_2	...	x_i	...	x_n
П р и з н а к и	1	P_{11}	P_{21}	...	P_{i1}	...	P_{n1}
	2	P_{21}	P_{22}		P_{i2}		P_{n2}
	...	...	...		...		...
	...	...	...		...		...
	j	P_{1j}	P_{2j}		P_{ij}		P_{nj}
	...	...	...		...		...
k		P_{1k}	P_{2k}	...	P_{ik}	...	P_{nk}

Рис. 1. Морфологическая матрица

Можно привести несколько примеров использования морфологического подхода. Так известен системно-морфологический подход к проектированию ядерной техники [6]. Авторы предлагают комбинаторную концепцию работы с вариантами решений (рис. 2). Метод позволяет достичь большого количества фактических данных. Описаны основы математического аппарата расчетов, используемых для решения оптимизационных задач в проектировании. Использование данного подхода позволяет исследовать большие массивы данных и строить иерархические модели (рис. 3).

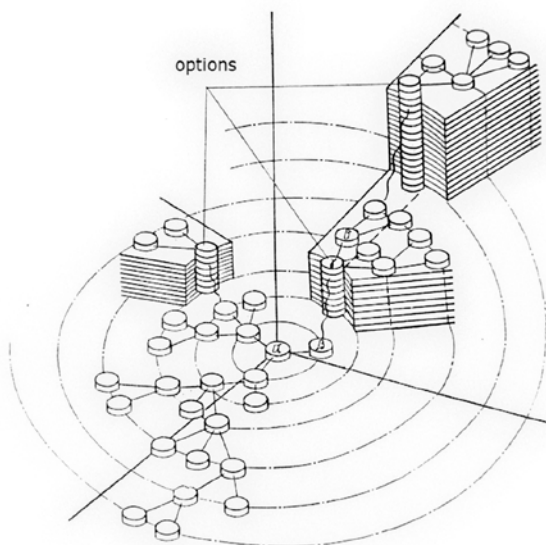


Рис. 2. Иерархические альтернативные линейки элементов и вариантов

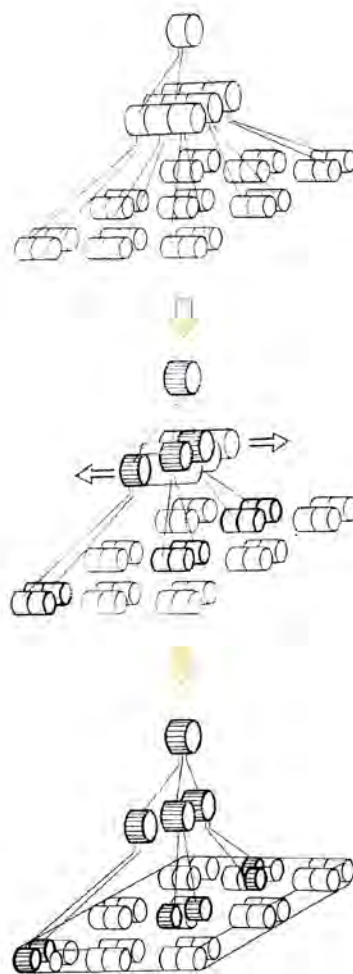


Рис. 3. Иерархический выбор вариантов

Можно отметить используемый авторами прогрессивный морфологический подход. После построения матрицы генерируется некоторое количество вариантов, включенных в кластеры, и строится морфологическое пространство решений (рис. 4). [7,8]. Сначала исследуются варианты технических решений кластеров (рис. 5), в которых находятся опорные варианты (рис. 6).

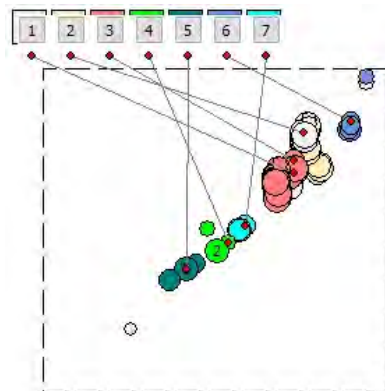


Рис. 4. Морфологическое пространство решений

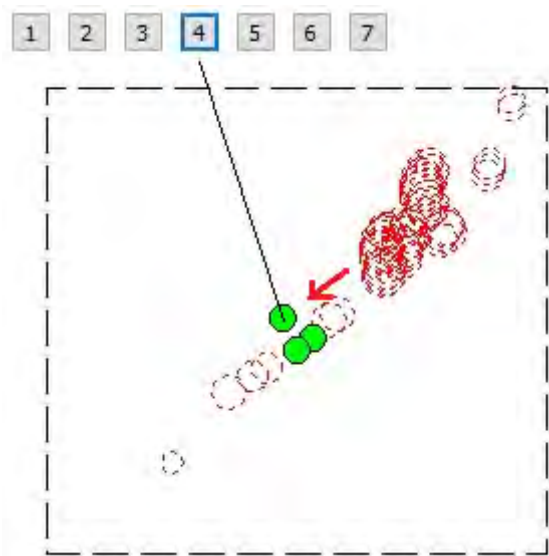


Рис. 5. Варианты технических решений в близлежащем кластере

	p ¹	p ²	p ³	p ⁴
P ₁	p ₁ ¹	p ₁ ²	p ₁ ³	p ₁ ⁴
P ₂	p ₂ ¹	p ₂ ²	p ₂ ³	
P ₃	p ₃ ¹	p ₃ ²	p ₃ ³	
P ₄	p ₄ ¹	p ₄ ²	p ₄ ³	
P ₅	p ₅ ¹	p ₅ ²		
P ₆	p ₆ ¹	p ₆ ²	p ₆ ³	
P ₇	p ₇ ¹	p ₇ ²		
P ₈	p ₈ ¹	p ₈ ²	p ₈ ³	

Рис.6. Опорный вариант в морфологической матрице

В случае если найденные варианты в данном кластере не позволяют существенно улучшить прототип, то принимается решение и исследуются другие кластеры. Целесообразно вести поиск в близлежащих кластерах постепенно расширяя поле поиска. Чем меньше мера сходства между опорным вариантами и сгенерированными, тем более оригинальными являются технические решения. С одной стороны, это позволяет достичь высоких показателей технического уровня, так как технический уровень в большой мере определяется степенью нововведений. Но, с другой стороны, модификация исходного варианта может оказаться радикальной и неприемлемой по экономическим затратам. С опорным вариантом сравниваются другие технические решения, в том числе – сгенерированные идеальный и конвергентные варианты. Также выясняется возможность улучшения и модернизации опорных технических

решений [9].

В заключение можно сделать вывод о том, что предложенный подход позволяет качественно рассмотреть большое количество альтернативных инновационных технических решений и, с учетом ограничений, выбрать наиболее рациональные решения, расположенные вблизи опорных.

На основе предложенного подхода проведены исследования более десяти различных технических систем и технологий. В результате удалось существенно повысить технический уровень исследуемых объектов.

1. Kohn S., Husig S. International Journal of Computer Applications in Technology, 2007, №30, 1741.
2. Zwicky F 1957 Morphological Astronomy (Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg)
3. Zwicky F. Discovery, Invention, Research - Through the Morphological Approach. Toronto. The Macmillan Company. 1969.
4. Одрин, В.М. Морфологический синтез систем: постановка задачи, классификация методов, морфологические методы конструирования. - Киев, 1986. - 37 с.
5. В. П. Мишин, М. И. Осин. Введение в машинное проектирование летательных аппаратов. - М.: Машиностроение, 1978. - 128 с.
6. В. М. Капустян, Ю. А. Махотенко. Конструктору о конструировании атомной техники. - М.: Атомиздат, 1981. - 190 с.
7. Rakov D. OKKAM – advanced morphological approach as method for computer aided innovation (CAI). MATEC WEB OF CONFERENCES The proceedings International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment: Mechanical Engineering and Materials Science (ICMTMTE 2019). 2019. С. 00120.
8. Rakov D.L., Sukhorukov R.Y., Pecheykina M.A. Choosing and Evaluating Fabrication Processes by Means of a Computer-Aided Innovation Support System Based on the Morphological Approach. Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2019. Т. 48. № 2. С. 173-178.
9. Барденхаген А., Печейкина М.А., Раков Д.Л. Возможности создания киберфизических систем на основе морфологического подхода. Journal of Advanced Research in Technical Science. 2021. № 23-2. С. 126-129.

ИССЛЕДОВАНИЕ СОВМЕЩЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРЕССОВАНИЯ ТРУБ «ПРЕССОВАНИЕ С РЕДУЦИРОВАНИЕМ» И «ПРЕССОВАНИЕ С РАЗДАЧЕЙ»

В.Г. Белов, К.В. Королев, Л.В. Попова

Российский технологический университет «МИРЭА», Москва, Россия; dek_ti@mail.ru

В работе представлены результаты исследования возможности использования совмещенных процессов «прессование с редуцированием» и «прессование с раздачей» для производства труб и профилей из меди и ее сплавов. Исследования проводили путем моделирования в программе QForm и при прессовании на прессе 15 МН. Использование совмещенных процессов позволяет расширить допустимую область реализации базового технологического процесса

Цель

Представлены результаты исследования возможности использования совмещенных процессов «прессование с редуцированием» (Рис. 1) и «прессование с раздачей» (Рис. 2) для производства труб и профилей из меди и ее сплавов. Базовым процессом является процесс прессования. Использование совмещенных процессов позволяет расширить допустимую область использования базового технологического процесса [1].

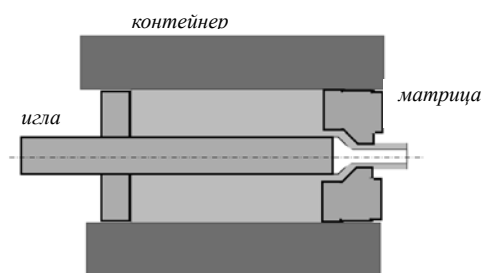


Рис. 1. Схема совмещенного технологического процесса «прессование с редуцированием».

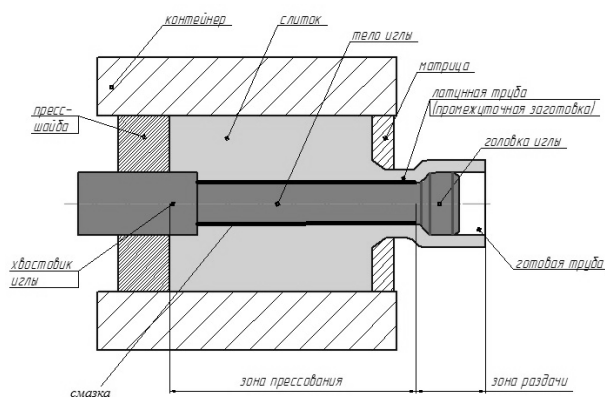


Рис. 2. Схема совмещенного технологического процесса «прессование с раздачей».

Материалы и методы исследования.

Исследования проводили путем моделирования принятых совмещенных процессов в программе QForm и при прессовании на горизонтальном гидравлическом прессе 15 МН. Материалы: медь М1,

латунь Л63, медно-никелевый сплав МНЖ5-1. Слиток диаметром 180 мм, длина 200 - 300 мм. Изделия: при «прессовании с редуцированием» - тонкостенные трубы с малым отверстием, при «прессовании с раздачей» - толстостенные трубы и профили с малым отверстием.

Результаты исследований.

«Прессование с редуцированием» - рис.1.

Данный технологический процесс целесообразно использовать при получении прессованных толстостенных изделий - труб или профилей с отверстием диаметром 20 мм и менее), когда стойкость прессовых игл недостаточна.

В рассматриваемом способе прессование трубы (профиля) ведется на неподвижной игле большего диаметра, что обеспечивает необходимую стойкость иглы.

Прессованная заготовка при выходе из прессовой матрицы поступает в зону редуцирования, где она за счет сил выдавливания проталкивается через коническую воронку в обжимную матрицу. При свободном обжиме происходит уменьшение внешних габаритов трубы, размеров отверстия и увеличение толщины стенки трубы.

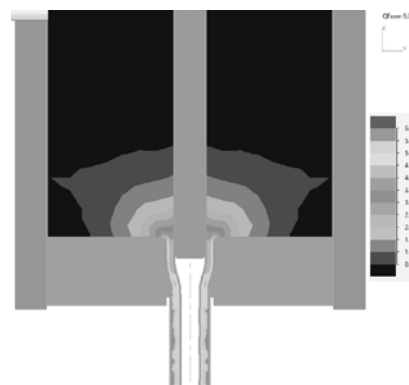


Рис. 3. Очаги деформации при «прессовании с редуцированием».

В процессе исследования варьировали диаметр прессовой матрицы, толщину стенки прессовой заготовки, диаметр матрицы редуцирования, угол конусности матрицы редуцирования.

Исследования показали, что рассматриваемый процесс, в зависимости от соотношения параметров, может протекать как в устойчивой (контролируемой) форме, так и неустойчивой, когда утолщение стенки при редуцировании происходит неконтролируемо, вплоть до заполнения всего внутреннего пространства изделия. Потеря устойчивости в исследованиях происходила при коэффициенте обжатия $m=(d/D)<0,66$, при угле конусности обжимной матрицы больше 15° (здесь d и D диаметры матриц редуцирования и прессовой).

В устойчивой форме процесс характеризуется двумя очагами деформации: при прессовании (в контейнере) и при редуцировании (в матрице). Толщину стенки после редуцирования t можно рассчитать по зависимости [2]:

$$t=s\sqrt{(D/d)}, \quad (1)$$

где s – толщина стенки прессованной трубы.

Энергетически данный процесс несколько более затратный, так как прессование ведется на иглах большего диаметра и неподвижных. Т.е. величина реактивных сил трения возрастает. Коэффициент вытяжки практически не меняется, а наличие редуцирования создает подпор, плюс сила обжима.

Однако, использование этого совмещенного процесса расширяет возможности базовой технологии.

Некоторые рекомендации при использовании этого процесса:

- наличие обжимной матрицы и использование заstopоренной при прессовании иглы приводит к тому, что после прошивки образовавшаяся пробка не отделяется от слитка, что сдерживает переход процесса в установившейся режим;

- при большой степени редуцирования в установившемся режиме возможны незначительные колебания толщины стенки готовой трубы после свободного обжима.

С учетом отмеченного рекомендовано использовать в данном процессе полые заготовки при прессовании и иглы с калибрующим носиком. Тем самым будет исключен процесс прошивки с неблагоприятным фактором «образование пробки» и обеспечена калибровка отверстия трубы без значительной термомеханической нагрузки на носик иглы.

«Прессование с раздачей» - рис.2.

Данный технологический процесс целесообразно использовать при прессовании тонкостенных труб с отверстием диаметром 20 мм и менее с целью сохранения смазки на теле иглы.

При использовании цилиндрических игл смазка, нанесенная на иглу, при прошивке слитка иглой снимается с поверхности иглы и остается на торцевой поверхности слитка. Тем самым, игла при прессовании работает без смазки, что отрицательно сказывается на стойкости иглы.

В рассматриваемом способе используется игла с проточкой (рис. 2), благодаря которой при прошивке

вся нанесенная на иглу смазка остается на теле иглы, что существенно улучшает условия ее работы. Прессование ведется на теле иглы, после чего труба раздается на головке иглы до требуемых размеров отверстия готовой трубы. Толщина стенки трубы определяется размером прессовой матрицы с учетом последующей раздачи трубы.

В процессе исследования варьировали диаметр прессовой матрицы, диаметр тела и головки иглы, толщину стенки прессовой заготовки, расстояние от матрицы до головки иглы.

Ограничения по варьированию рассматриваемых параметров:

- диаметр головки иглы равен внутреннему диаметру готовой трубы,
- диаметр матрицы должен быть больше головки иглы (чтоб игла не попала в матрицу при прошивке),
- диаметр тела иглы должен быть меньше диаметра головки иглы (для удержания смазки на игле),
- разность между диаметром матрицы и диаметром тела иглы равна удвоенной толщине стенки готовой трубы.

С учетом приведенных ограничений и поставленных задач приняты параметры эксперимента и рассматриваемые схемы:

Параметры заготовки

Материал – Л63;

Диаметр слитка – $D_{сл} = 168$ мм;

Длина слитка – $L_{сл} = 209$ мм;

Температура – $T_{заг} = 780^\circ\text{C}$

Параметры инструмента:

Материал иглы – 3Х2В8Ф;

Диаметр контейнера – $D_k = 180$ мм;

Диаметр головки иглы – $D_{гол} = 32, 35, 36$ и 39 мм;

Диаметр тела иглы – $D_{иг} = 30$ и 33 мм;

Диаметр матрицы – $D_m = 38$ и 40 мм.

Схемы деформации:

Пресс.труба: диам. (30х38)→после раздачи (32х40),

Пресс.труба: диам. (30х38)→после раздачи (36х44),

Пресс.труба: диам. (33х38)→после раздачи (35х40),

Пресс.труба: диам. (33х38)→после раздачи (38х43)

и др.

Исследования показали, что рассматриваемый процесс, в зависимости от соотношения параметров, может протекать как в устойчивой (контролируемой) форме, так и неустойчивой, когда теряется продольная устойчивость прессованной заготовки перед раздачей с образованием гофра по телу иглы.

С увеличением величины раздачи и расстояния от матрицы до головки иглы (длина тела иглы) вероятность перехода от устойчивого состояния процесса в неустойчивое состояние возрастает.

При абсолютной раздаче до 2 мм по диаметру (по 1 мм по радиусу) процесс протекает устойчиво при любой исследованной длине иглы. Зазор в 1 мм вполне достаточен для удержания смазки по игле

В устойчивой форме процесс характеризуется двумя очагами деформации: при прессовании (в контейнере) и при раздаче в месте перехода от тела

иглы к головке (рис. 4).

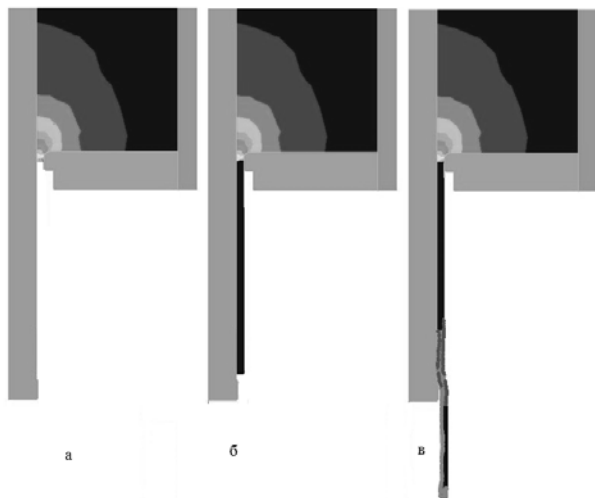


Рис. 4. Деформация слитка при «прессовании с раздачей»: а – прошивка, б – прессование, в – прессование с раздачей.

При прессовании с раздачей измеряли толщину стенки трубы.

Труба, находящаяся между матрицей и головкой иглы, находится в состоянии сжатия, что приводит к некоторому увеличению толщины стенки, причем чем тоньше стенка, тем больше утолщение. Отмеченная закономерность была отмечена и в работах [3, 4], где рассматривали технологию прессования буровых труб с утолщенными концами. Данный процесс способствует уменьшению возможной

разностенности.

При раздаче, наоборот, стенка утоняется, и чем толще стенка, тем больше утонение, что также способствует выравниванию толщины стенки трубы, т.е. физика процесса способствует снижению разностенности труб.

По энергозатратам данный процесс практически такой, как и аналог: прессуем меньшую по сечению трубу и затем раздача до требуемого размера. Однако наличие смазки по игле компенсирует этот незначительный рост.

Основное преимущество – повышение стойкости прессовых игл, что расширяет границы использования базового процесса «прессование».

1. Огинский И. К. Таратута К. В. Восточный С. Н. Совмещенные процессы в обработке металлов давлением. ISSN 2076-2151. Обработка материалов давлением. 2018. № 1 (46) 167
2. Зубцов М.Е. Листовая штамповка. 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1980. – 432 с.
3. Каргин В.Р., Афанасьев А.Е., Каргин Б.В., Ерисов Я.А. Влияние противодействия при прямом прессовании труб с раздачей. Самара: Изд-во МИР, 2018.
4. Каргин В.Р., Афанасьев А.Е., Каргин Б.В. Моделирование процесса прессования буровых труб с наружными утолщениями // Известия Самарского научного центра Российской академии наук – 2016 - Т.18 - No1(2) – С. 215-219.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ПЛАВЛЕНИИ АЛЮМИНИЯ

И.В. Белоусов, Н.И. Минаева, К.Д. Кузнецова

Российский технологический университет РТУ «МИРЭА», Москва, Россия

Известно, что при импульсной лазерной сварке значение КПД составляет ~ 10-20%, что обусловлено как высокой теплопроводностью, так и поглощением и отражением лазерного излучения. Проведено исследование повышения эффективности использования излучения при сварке CO₂ лазером за счет введения в сварочную ванну порошков никеля с алюминиевым покрытием и меди.

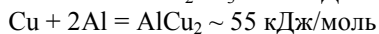
Большие потери на теплоотвод и отражение лазерного излучения значительно понижают КПД использования энергии лазерного импульса при образовании сварных швов. Для оценки эффективности используют термический коэффициент полезного действия:

$$\eta_t = W_{\text{ш}} / W_{\text{и}} = (m c T + m L) / \kappa * Q \quad (1)$$

где $W_{\text{ш}}$ – энергия нагрева и плавления металла шва, Дж; $W_{\text{и}}$ – энергия импульса с учетом отражения излучения от поверхности свариваемого металла, Дж; κ – коэффициент поглощения лазерного излучения; m, c – масса и теплоемкость, T, L – интервал температур от начальной до температуры плавления и удельная теплота плавления.

Учитывая, что критическая плотность мощности $8,6 \cdot 10^5$ Вт/см², при которой алюминий начинает испаряться, значительно выше выбранной в данном исследовании и равной $(0,2-0,9) \cdot 10^5$ Вт/см² – энергос затратами на испарение металла шва в данном исследовании было решено пренебречь.

Экзотермические реакции с последующим выделением энергии, в результате протекания которых возникает ряд интерметаллидов: CuAl₂, NiAl, Ni₂Al₃, Ni₃Al, и др., и реакции взаимодействия активных металлов с оксидами сопровождаются выделением энергии, могут применяться для образования ванны расплава:



Добавление присадочных металлов в виде прослоек из указанных материалов приводило, в ряде экспериментов, к увеличению размеров образовавшейся сварочной ванны.

Анализ результатов исследований продемонстрировал эффективность применения присадочных материалов для повышения КПД импульсной лазерной сварки алюминия, за счёт возникновения экзотермической реакции.

Анализ результатов демонстрирует, что использование меди в качестве присадочного материала дает значительно меньший прирост КПД в сравнении с результатами исследований с никелем в качестве присадочного материала. Время нагрева до температуры плавления меди в два

раза больше, чем никеля – 0,002 с, и 0,00 1с, соответственно при плотности мощности облучения 10^5 Вт/см².

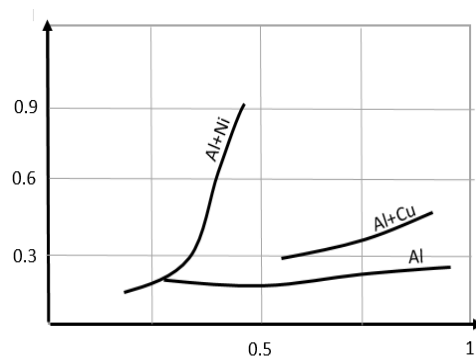


Рис.1. Влияние плотности мощности облучения на термический КПД при ИЛС алюминия с использованием в качестве присадочных металлов никеля и меди.

На рис. 2 показаны значения длительности нагрева до температуры плавления алюминия и присадочных металлов, никеля и меди, применявшихся в экспериментальных исследованиях. При нагреве в контакте с алюминием (металл – 1) для никеля (металл – 2):

$$K_e = 2,2 \cdot 2,7 \cdot 0,96 / 0,89 \cdot 8,9 \cdot 0,45 = 1,59;$$

для меди (металл – 2):

$$K_e = 2,2 \cdot 2,7 \cdot 0,96 / 3,87 \cdot 8,9 \cdot 0,39 = 0,42.$$

Исходя из полученных результатов можно сделать вывод, что начальная стадия активации реакции возникновения интерметаллидов напрямую зависит от длительности возникновения сварочной ванны.

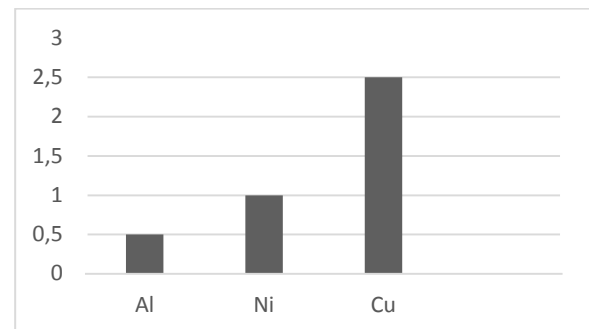


Рис. 2. Длительность нагрева (миллисекунды) до температуры плавления алюминия и присадочных металлов никеля, меди ($q=10^5$ Вт/см²)

Уменьшение термического КПД при сварке с никелевой прослойкой очевидно обусловлено задержкой активации реакции образования интерметаллидов поскольку температура зажигания смеси алюминия с никелем выше – 860...880°C. Задержка активирования реакции, сопровождающейся выделением тепла, определяет суммарное теплосодержание и массу расплавленного металла сварочной ванны.

Теплоотвод от места соединения имеет большое значение в балансе энергозатрат в процессе образования сварного шва.

Массовая доля никеля в качестве присадочного материала в исследованиях по импульсному лазерному излучению сплава АМг2 составила 0,25. Исследование оценки воздействия присадочного металла проводилось в рамках эксперимента с прослойкой из меди, толщиной в пределах 0,1-0,4 мм.

Показатель длительности импульса в проведенных исследованиях составил 15 мс. При ИЛС без присадочного металла величина термического КПД превышает на 5...7% значения, полученные для коротких импульсов (4 мс). Наибольшее КПД достигнуто на прослойке толщиной 0,15 мм. и составляет 61%. Для рассматриваемых составов материалов выявлено, что при использовании меди, КПД импульсного лазерного излучения снижается на 35% в сравнении с результатами, получаемыми при добавлении в состав никеля. Уменьшение производительности обуславливается существенно большими время и энергозатратами на возникновение сварочной ванны. Анализ энергии, необходимой для протекания реакции $Al+Cu$ составляет 280 кДж / моль.

С ростом толщины прослойки меди, потери энергии, в связи с теплоотводом увеличиваются и эффективность излучения снижается. Экспериментально выявлено, что при толщине медной прослойки 0,4 мм, показатель КПД располагается в пределах 9 - 23% - что является стандартным показателем для импульсных лазерных процессов, в связи с чем, следует вывод об отсутствии эффекта тепловыделения при протекании реакции взаимодействия $Al+Cu$.

Вывод

Получение самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, позволяющего получить однородный продукт реакции, при использовании импульсной лазерной сварки является недостижимым в силу короткой длительности импульса и ликвации расплава в процессе образования сварного соединения.

Материалы, подобранные в качестве присадочных, вступают в реакцию с алюминием, инициируя образование интерметаллидов. Реакции образования интерметаллидов сопровождаются выделением энергии: $NiAl$ – 1,46 Дж/мг.; $CuAl_2$ – 0,7 Дж/мг., которая может быть использована для повышения эффективности ИЛС.

Показано, что при выборе присадочного металла с целью повышения термического КПД процесса ИЛС алюминия следует учитывать теплофизические свойства, определяющие длительность нагрева до температуры плавления и энергию активирования взаимодействия свариваемого и присадочного металлов.

1. Минаева Н.И., Баженов В.В., Привезенцев В.И., Леваков В.С. Метод количественной оценки склонности сварных соединений к образованию горячих трещин при импульсной лазерной сварке. - М.: Сварочное производство, №8, 1992.-с. 41-42.
2. Минаева Н.И., Чунихин Н.Н., Белоусов И.В. Методика оценки перемещений, вызванных усадкой при импульсном лазерном плавлении/ Российская научно-техническая конференция с международным участием. «Оптические технологии, материалы и системы» («Оптотех - 2020») (РНТК ФТИ -2020): Сборник докладов конференции Физико-технологического института Российского технологического университета. Москва –10-11 декабря 2020 г., М.: МИРЭА, 2020.

ПРИМЕНЕНИЕ ЦЕЛЕВЫХ ИСКАЖЕНИЙ В ИЗОБРАЖЕНИЯХ СИСТЕМ ТЕЛЕМЕТРИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Бельченко Ф.М.⁺, Ермолов И.Л.⁺⁺

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, г. Москва, Россия; ⁺philepp@mail.ru;

⁺⁺ermolov@ipmnet.ru

В работе исследуются вопросы применения преобразования перспективы передаваемых видеоизображений в машиностроении. Работа построена на использовании наработок из теории представления перцептивного пространства в средствах телеметрии космических аппаратов. Целью работы является снижение процента ошибок операторов при управлении средствами телеметрии и видеонаблюдения, вызванных недостоверностью или низким качеством передаваемого изображения.

В разное время проблемами зрительной системы человека занимались такие ученые, как Н.Д. Нюрберг, М.М. Бонгард и А.Л. Ярбус. Они внесли большой вклад в изучение биологических проблем и особенностей зрения человека, а также заложили основы возможного применения своих исследований в технике.

Прикладные исследования по тематике проекта, нашедшие применение в технических

системах, наиболее активно проводятся несколько последних десятилетий. Впервые результаты данных исследований были внедрены в космической отрасли академиком Б.В. Раушенбахом. Во время стыковки для наблюдения за другим кораблем применялись оптические приборы, которые давали изображение по законам геометрической оптики (линейной перспективы) [1].



Рис. 1. Варианты представления перспективы по теории Б.В. Раушенбаха. (+) – повышение достоверности характеристики, (-) – понижение достоверности характеристики

В связи с этим Б.В. Раушенбах пытался ответить на вопрос: насколько точно эти изображения передают пространство, т.к. стыковка кораблей требовала идеальной точности [2, 3].

По мере развития и внедрения систем телеметрии часто встает ряд проблемных вопросов, которые необходимо учитывать разработчикам и пользователям.

Первая проблема заключается в том, что изображение трехмерного пространства, передаваемое на плоский дисплей оператора, претерпевает ряд искажений, которые неточно передают информацию об объективной реальности.

Следующая проблема заключается в том, что если требуется рассмотреть объекты, расположенные на определенном удалении, то необходимо «зуммировать» изображение, что в случае с программными алгоритмами значительно

снижает качество изображения, а использование аппаратных оптических средств требует наличия более сложного оптического зума. Особенно эта проблема становится актуальной при использовании видеокамер с широкими углами обзора, где сложнее рассмотреть детали отдельных объектов.

Ещё одна проблема вызвана использованием пультов управления телеметрическими системами, которые имеют ограниченные размеры, что свою очередь влияет и на размер дисплея, на котором сложно наблюдать за малыми деталями окружения. Следовательно, оператору часто приходится лишний раз использовать вышеуказанные методы изменения характеристик изображения, тратя дополнительное время и усилия, чтобы получить точную информацию о наблюдаемых объектах.

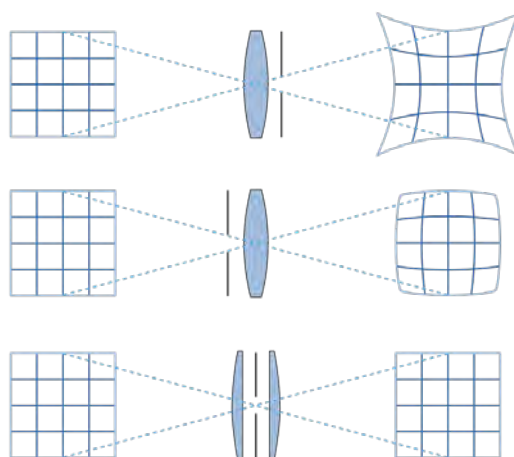


Рис. 2. Примером нецелевого искажения является дисторсия, вызванная особенностью линз камер [4]

Для решения указанных проблем Институтом проблем механики РАН предлагается использовать целевые искажения перспективы на изображении. Был разработан прототип

программного средства, реализующего алгоритмы линейного преобразования перспективы[5]. Предложен ряд сценариев использования алгоритма при разных условиях [6].

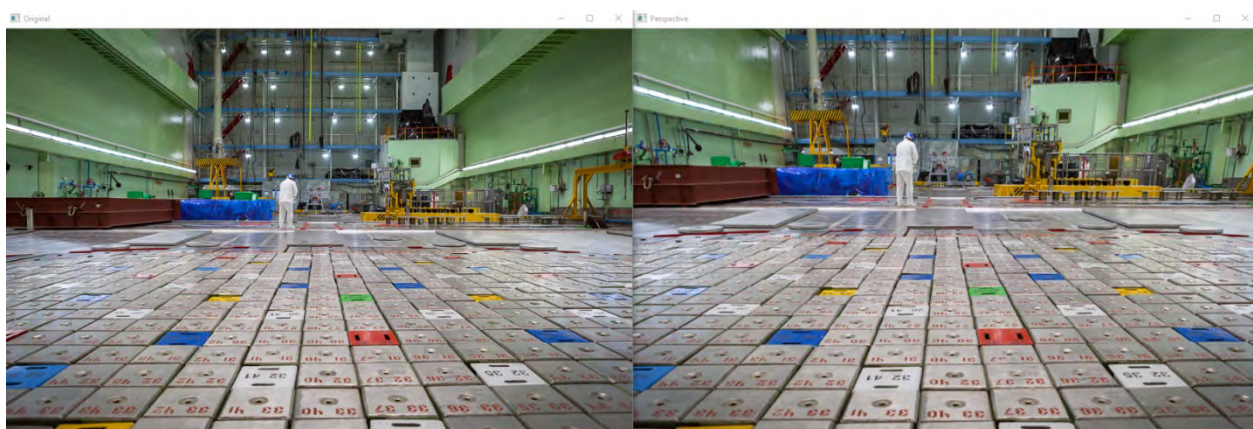


Рис. 3. Искажение перспективы, позволяющее показать больше деталей на дальнем плане

Исследуемый алгоритм может найти применение в системах телеметрии и видеонаблюдения на машиностроительных предприятиях для контроля возникновения внештатных ситуаций [7]. Если камера ограничена в управлении и по функционалу, то внесение целевых искажений позволит

осуществлять виртуальный поворот, увеличение отдельных областей изображений или повышать достоверность отображения объектов на различных плоскостях.

Часть работы над данным материалом выполнена по теме государственного задания (№ госрегистрации АААА-А20-120011690138-6).

1. Ermolov I. A novel data fusion architecture for unmanned vehicles // 21st International Symposium on Measurement and Control in Robotics ISMCR'2018 26-28 September 2018- Vol. 3.
2. Ковалев А.М. О визуальном воспринимаемом пространстве предметов // Автометрия. 2003. Том 39, №6 – 3-12 с.
3. Раушенбах Б.В. Геометрия картины и зрительное восприятие. – СПб. Азбука-классика, 2002. – 320 с.
4. Интернет: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%80%D1%81%D0%B8%D1%8F>. Дата обращения 4.10.2021.
5. Гарсия Г., Суарес О., Аранда Х., Терсеро С., Грасия И., Энано Н. Обработка изображений с помощью OpenCV / пер. с англ. Слинкин А. А. – М.: ДМК Пресс, 2016. – 210 с.
6. Бельченко Ф.М., Ермолов И.Л. Разработка концепции системы телеметрии РТК с возможностью внесения целевых искажений отображаемого пространства, Робототехника и техническая кибернетика. – Т. 9. - №1. – Санкт-Петербург: ЦНИИ РТК. – 2021. – С. 26-31.
7. Бельченко Ф. М., Ермолов И. Л. Внесение целевых ситуационных искажений в системах телеметрии// Материалы XIV Всеросс. мультikonф. по проблемам управления. — Ростов-на-Дону: Таганрог, 2021. – С.119-121.

ПРОБЛЕМЫ, ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ В ОТКРЫТОМ КОСМОСЕ

М.А. Броновец

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия; brnovets@ipmnet.ru

В докладе рассмотрены проблемы, цели и задачи экспериментов по изучению трения и изнашивания материалов в открытом космосе. Рассмотрены концепции проведения экспериментов, выбор схем испытаний, проблемы создания научной аппаратуры, особенности тензометрических устройств и задания требуемой точности измерений. Описаны подходы в выборе материалов для испытаний на трение и износ. Показаны обоснованность и целесообразность проведения таких экспериментов в открытом космосе.

Введение

В последнее время всё чаще возникает вопрос – зачем нужно проводить испытания материалов на трение и износ в открытом космосе. Какую дополнительную информацию мы получим в сравнении с испытаниями в наземных вакуумных камерах. Оправдано ли это?

Ответим сразу – оправдано. Для дальнейшего развития космической техники крайне необходимы достоверные сведения о фрикционных свойствах материалов в открытом космосе. Рассмотрим это на примере работы подвижных сопряжений и узлов трения на внешней стороне Международной космической станции.

В настоящее время прилагаются большие усилия по созданию робототехнических систем космического назначения для работы в открытом космосе. Они ведутся во всех космических державах и должны облегчить работу космонавтов на внешней стороне станции, а в каких-то случаях даже заменить космонавтов.

Для точности позиционирования и обеспечения заданного ресурса работы в них применяются подшипники качения, которые смазываются пластичными смазочными материалами. Пределы работоспособности смазочных материалов по низкотемпературным свойствам не укладываются в температуры на внешней стороне МКС (рис.1а и 1б). Отсюда следует, что для подвижных сопряжений надо использовать экранно – вакуумную изоляцию с подогревом. Для этого нужно существенно усложнять конструкции робототехнических систем.

Что касается спутников дистанционного зондирования земли, то в них используются системы ориентации спутника, которые используют гиродинны на газодинамическом подвесе, кулачковые механизмы регулирования качества снимков, приводы поворота солнечных батарей, включающие подшипники качения, подшипники скольжения, зубчатые передачи. Все эти трибологические сопряжения и узлы требуют применения соответствующих конструкционных и смазочных материалов. Они работают в открытом космосе и определяют ресурс работы спутников, который в большинстве случаев не соответствует современным требованиям.

Вязкостные характеристики пластичных смазочных материалов при низких температурах

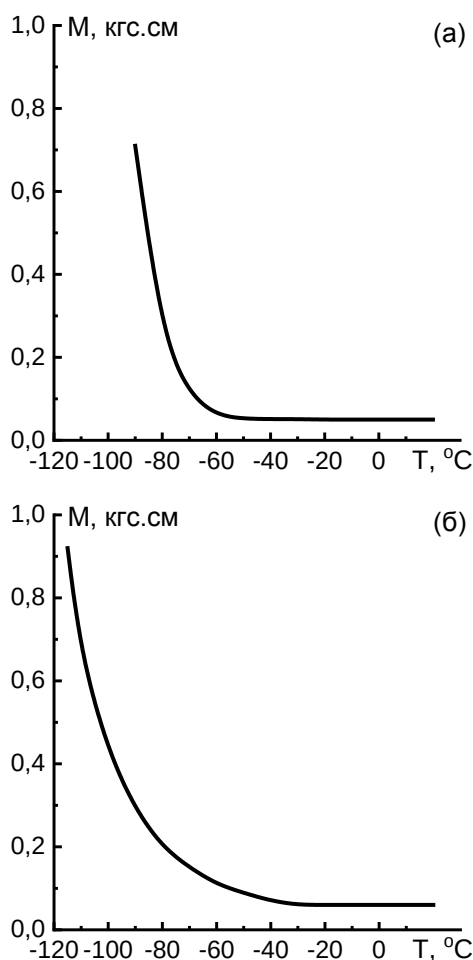


Рис. 1. Зависимости момента страгивания подшипника качения со смазками ВНИИ НП-274 (а) и ВНИИ НП-284 (б) при низких температурах

Обе смазки относятся к числу лучших смазок космического применения. ВНИИ НП-274 одна из наиболее употребительных гостированных низкотемпературных смазок. При температуре ниже минус 60°C её вязкость с понижением температуры начинает быстро возрастать и при минус 90°C она не пригодна для эксплуатации.

Смазка ВНИИ НП-284 более устойчива к низким

температурам. Предел её использования 110°C.

На Международной космической станции нижний предел минусовых температур, задаваемых техническими условиями использования научного оборудования, составляет минус 125°C.

Теоретически можно создать смазочную композицию из органических соединений, работоспособную до температур минус 130°C.

Гибридные подшипники качения

При проведении работ по специальным подшипникам, наряду с отработкой самой конструкции подшипника, особое внимание уделяется подбору материалов деталей, вопросам смазывания и охлаждения. Наряду с использованием традиционных материалов (стали, сплавы, цветные металлы) в настоящее время проводятся исследования керамических материалов.

В последние годы появилась острая необходимость в применении для деталей подшипников керамических материалов. Это связано с уникальным комплексом их свойств, таких как легкость, прочность, износостойкость, химическая инертность, низкий коэффициент трения, отсутствие химического взаимодействия с подавляющим числом материалов и др.

Поскольку при вращении подшипника с деталями из керамических материалов выделяется меньше тепла, такие подшипники смогут работать в условиях перебоев в подаче смазки в подшипник, а в ряде случаев даже без смазки. Подшипники с телами качения из керамики обеспечивают снижение центробежной нагрузки от тел качения на наружное кольцо по сравнению со стальными телами качения.

Среди подшипников интерес представляют гибридные подшипники с шариками из нитрида кремния, которые до последнего времени в космических изделиях не применялись.

Важно создание подшипников качения новых поколений для работы в глубоком вакууме, особо маломощных, подшипников повышенной износостойкости из новых сверхтвердых материалов для тел качения и специально разрабатываемых термомеханических методов упрочнения деталей сложной формы, обеспечивающих их высокую работоспособность с деталями из сверхтвердых материалов.

Из керамических материалов в подшипниках качения чаще всего применяется нитрид кремния, изготовленный методом горячего прессования. Этот керамический материал благодаря своим сильным атомным, ковалентным связям обладает очень большой твердостью и повышенной износостойкостью, высокой сопротивляемостью к деформации при повышенных температурах и более низкой плотностью по сравнению, например, со сталью, что позволяет повысить рабочую температуру, быстроходность, долговечность и надежность.

Горячепрессованный нитрид кремния в настоящее время обладает максимальной прочностью по сравнению с другими керамическими материалами и

особенно перспективен в качестве материала для высоконагруженных подшипников. Наиболее интенсивно работы по созданию гибридных подшипников для космической техники ведутся в США, Японии, Швеции, Китае.

Важное преимущество керамических материалов - высокий и практически стабильный уровень механических свойств - обеспечивается тонкодисперсной структурой с повышенной кристаллическостью и тугоплавкостью. Высокая твердость в сочетании с низкой истираемостью позволяет достичь более тонкой финишной обработки и высокой долговечности подшипников.

Для работы в открытом космосе характерны следующие параметры внешней среды:

- вакуум 10^{-6} - 10^{-8} мм рт. столба;
- воздействие солнечной радиации и космических излучений;
- диапазон температур от минус 150°C до плюс 150°C;

Поскольку опыта работы гибридных подшипников в открытом космосе до сих пор нет ни в российской, ни в зарубежной практике, целесообразно выдержать требование его работоспособности 10 лет, в том числе с периодом активного функционирования в течение 5 лет.

Нитрид кремния обладает следующими свойствами:

- низкая плотность, 40 % от плотности стали;
- низкое тепловое расширение, 29 % от теплового расширения стали;
- высокий модуль упругости, 151 % упругости стали;
- высокая твердость, HV10 при 20 °C составляет 1700 по сравнению с 700 для подшипниковых сталей;
- низкое трение;
- выдерживает высокие температуры, не теряя твердости;
- стойкий к химическому воздействию и коррозии;
- немагнитный;
- электрический изолятор.

Горячепрессованный нитрид кремния в настоящее время обладает максимальной прочностью по сравнению с другими керамическими материалами и особенно перспективен в качестве материала для высоконагруженных подшипников.

Более высокий модуль упругости нитрида кремния в сравнении со сталью обеспечивает более высокую жесткость подшипника. Увеличение жесткости при статической нагрузке составляет 10 %.

Гибридные и керамические подшипники значительно повышают (от 20 до 60%) скоростные и другие эксплуатационные показатели приводов в сравнении с традиционными конструкциями и сохраняют работоспособность в условиях, при которых подшипники из подшипниковых сталей уже работать не могут. Из зарубежной практики известно об успеш-

ном применении гибридных подшипников в изделиях авиационной техники. Такие подшипники (для специальной техники) относятся к продукции двойного назначения и в Россию не поставляются.

Более высокий модуль упругости нитрида кремния в сравнении со сталью обеспечивает более высокую жесткость подшипника. Увеличение жесткости при статической нагрузке составляет 10 %.

Гибридные подшипники, оставаясь в 1,5 - 5 раз дороже металлических из-за преимуществ в эксплуатации вытесняют металлические подшипники в целом ряде изделий.

С повышением частоты вращения жесткость подшипника уменьшается, но это уменьшение меньше для гибридных подшипников, чем для подшипников со стальными шариками того же размера. При частоте вращения 40000 об/мин радиальная жесткость гибридного подшипника уменьшается до 70 % статической жесткости, в то время как жесткость сопоставимого подшипника со стальными шариками уменьшается до 61 %.

Подшипники с керамическими телами качения, имеющими коэффициент теплового расширения всего лишь 29 % от коэффициента теплового расширения стальных тел качения, менее чувствительны к разнице температур колец. Последнее очень важно для космической техники, где диапазон низких и высоких температур очень широк.

Космический эксперимент «Трибокосмос»

В КЭ «Трибокосмос» планируется проведение испытаний при скольжении по схемам «Диск-индентор» (рис.2) и «Вал-полувтулки» (рис. 3) при скоростях скольжения и удельных давлениях, соответствующих реальным диапазонам параметров в подвижных сопряжениях космической техники [1]. Будут испытаны конструкционные материалы и материалы с покрытиями и современные смазочные композиции.

Планируется изучить реальное изменение вязкости смазочных композиций под воздействием космических излучений и перепада температур, а также её изменение со временем пребывания на орбите. Для повышения точности измерений в тензометрии НА «Трение» планируется использовать моносulfид самария, который обладает уникальной стойкостью к перепадам температур и обеспечивает высокую точность измерения фрикционных характеристик. Его использование в трибологии будет произведено впервые.

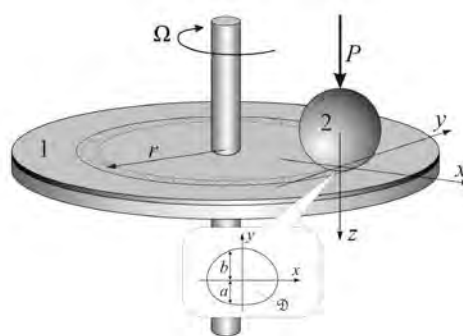


Рис. 2. Схема испытаний диск-индентор

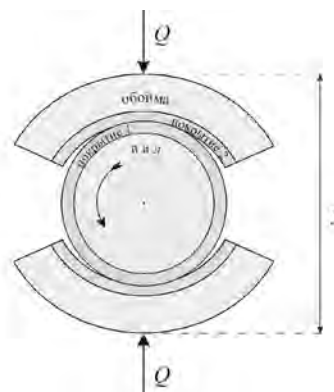


Рис. 3. Схема испытаний вал-полувтулки

Учитывая важность определения работоспособности подшипников качения в открытом космосе в космический эксперимент «Трибокосмос» включён специальный блок научной аппаратуры для испытаний подшипников качения.

Испытания планируется провести в диапазоне максимального перепада температур, при открытом для облучения солнечными лучами исполнении, с установкой подшипников в направлении движения Международной космической станции и против движения при скоростях вращения до 3000 об/мин.

Будут испытаны подшипники, планируемые для использования в робототехнических системах, а также экспериментальные гибридные подшипники с керамическими шариками, разработанные для использования в космических изделиях дальнего космоса.

Будут показаны возможности использования смазочных материалов в открытом космосе.

1. Bronovets M.A. Tribology Problems in Space. CD-ROM Proceedings of 5th World Tribology Congress. Turin, Italy, 8-13 September 2013, №152, ISBN 978-88-908185.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ И ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗНАШИВАНИЯ ФРИКЦИОННЫХ УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИТОВ

П.О. Буковский

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия; bukovskiy.pavel@gmail.com

Представлены результаты оценки коэффициента трения и интенсивности изнашивания фрикционных углерод-углеродных композитных материалов по схеме контакта кольцо–кольцо в среде инертного газа по методике планированного эксперимента. Получено – коэффициент трения для всех исследуемых материалов уменьшается при увеличении нагрузочно-скоростных параметров.

Цель

Сравнительная оценка коэффициента трения и интенсивности изнашивания углерод-углеродных композитных материалов (УУКМ) на основе графитированных и карбонизованных волокон в среде инертного газа.

Материалы и методы

В работе исследовались четыре типа образцов из УУКМ. Образцы первого типа были изготовлены на основе графитированных углеродных волокон с длиной филаментов 40 мм. Образцы второй и третьей группы были изготовлены на основе карбонизованных углеродных волокон и отличались между собой длиной филаментов 40 и 6 мм соответственно, а также наличием дополнительного армирования углеродной матрицы, дробленным графитированным волокном. Образцы четвертого типа были изготовлены на основе войлока, который на финальной стадии уплотнения перпендикулярно пробивался при помощи иглопробивной машины. Образцы изготавливались в виде колец, имеющих размеры: внешний и внутренний диаметры 28 и 20 мм соответственно, высота 15 мм. При такой форме образцов сложно добиться идеальной соосности, поэтому все образцы были дополнительно переточены на токарном станке к конусному виду (внешнее и внутреннее) с углом конуса 50 градусов.

Экспериментальное исследование коэффициента трения и интенсивности изнашивания проводилось на лабораторном трибометре UMT-2 по схеме контакта кольцо–кольцо по методике планированного эксперимента [1] с вариацией контактных давлений P от 0,5 до 1 МПа и скоростей скольжения V от 1 до 4 м/с. Во время проведения экспериментов происходил фрикционный разогрев пары трения, при максимальных нагрузочно-скоростных условиях температура достигала отметки в 1200°C. Как известно из литературы [2], так и из собственных экспериментов начиная с температуры 400°C поверхность углеродных композитов в воздушной среде начинала окисляться и в последствие гореть. Для избегания горения исследуемых образцов все испытания были проведены в среде инертного газа – аргона.

Результаты и их обсуждение

Зависимости коэффициента трения μ от мощности трения PV для всех типов УУКМ представлены на рис. 1.

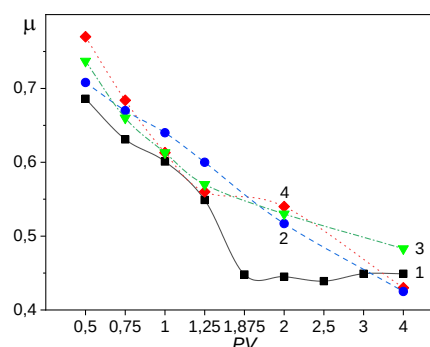


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения μ от мощности трения PV для всех исследуемых образцов 1 – 4 соответственно.

Анализ данных показывает, что коэффициент трения для всех исследуемых образцов уменьшается при увеличении мощности трения с характерным фрикционным разогревом. Полученные данные схожи с результатами работы [3], в которой соотнесли снижение коэффициента трения при росте температуры с природой углерода.

На рис. 2 представлены зависимости интенсивности изнашивания I от мощности трения PV для всех исследуемых углеродных образцов.

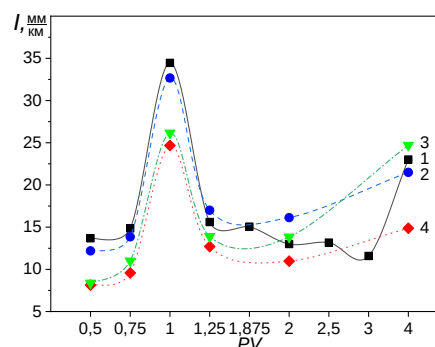


Рис. 2. Зависимость интенсивности изнашивания I от мощности трения PV для всех исследуемых образцов 1 – 4 соответственно.

Анализ рис. 2 показывает, что интенсивность изнашивания имеет закономерный характер, обусловленный природой углерода. Для всех исследуемых материалов наблюдается пик интенсивности изнашивания при $PV = 1$, при данных условиях трения происходило испарения влаги, и вследствие сильного износа.

В настоящей работе для схемы контактного взаимодействия кольцо – кольцо было получено, что добавление в состав дробленного графитированного волокна (3 тип образцов) снижает износ пары трения в 1,5 раза по сравнению со 2-й группой, при этом коэффициент трения остался на прежнем уровне. Самый низкий износ показывает материал 4-й группы, это связано с отличительной методикой изготовления данного материала [4], в которой используются дополнительные перпендикулярные дорожки трения углеродные нити. При этом у 4-й группы имеется существенный недостаток, заключающийся в стоимости изготовления. Для получения достоверных результатов интенсивности изнашивания целесообразно проводить испытания в инертной среде, т.к. влияние кислорода при повышенных

температурах сильно оказывает влияния на износ углерода.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-19-00548).

Все исследуемые материалы были предоставлены АК «Рубин». Автор выражает благодарность В.В. Кулакову и А.К. Голубкову за помощь и техническую поддержку проведенного исследования.

1. Буковский П.О., Морозов А.В., Кириченко А.Н. Влияние приработки на коэффициент трения углеродных композитных материалов авиационных тормозов // Трение и износ. 2020. Т. 42. № 4. С.448–456.
2. Чичинадзе А.В., Албагачиев А.Ю., Кожемякина В.Д., Коконин С.С., Суворов А.В., Кулаков В.В. Оценка фрикционно-износных характеристик отечественных углеродных фрикционных композиционных материалов для нагруженных тормозов самолетов // Трение и износ. 2009. Т. 30. № 4. С.359–371.
3. Крамаренко Е.И., Кулаков В.В., Кенигфест А.М., Лисовский С.А., Мозалев В.В. Авиационные тормоза с углеродными фрикционными дисками // Трение и износ. 2006. Т. 27, № 3. 290–298.
4. Chen T., Gong W., Liu G. Effects of fiber-types on braking behavior of carbon-carbon composites // Material Science and Engineering A. 2006. Vol. 441. P.73–78.

ОБ ОБРАТНОВОЛНОВОЙ МЕХАНИКЕ, ЭЛЕКТРОДИНАМИКЕ И ТЕХНОЛОГИИ

В. М. Бырдин

Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва, Россия. V_M_Byrdin@mail.ru

Аннотация. Обратноволновая концепция базируется на адирекции (на противоположности фазовой и групповой скоростей), включает: 1) обратноволновую, ОВ-, феноменологию, систему явлений и свойств, 2) пересмотр положений теории прямых (обычных) волн и 3) ОВ-технологии. Феноменология группируется в 4-х классах: дифракционные, кинематические, нелинейные и динамические (вкл. акустоэлектронику). Дан перечень известных ОВ-приложений. Основной вклад в ОВ-теорию внесла советская и российская наука, начиная с Л. И. Мандельштама, В. Е. Пафомова, В. Г. Веселаго, работы 1940/60-х гг., и многих современных коллег. Систематической теории обратных волн всё ещё не создано.

1. Введение. Теория обратных волн насчитывает уже более ста лет – от статьи Горака Лэмба 1904-го г., англ. механика (Lamb Horace, 1849-1934 гг. жизни). В последние два-три 10-летия теория и технологии обратных волн получили бурное развитие в смежных областях радиопизики, оптики, акустики и механики. В частности, автором рассмотрено несколько ОВ-задач, дифракционные эффекты и в целом представлена феноменология обратных волн (ОВ) в механике и электродинамике. В данном докладе дана сущность ОВ-концепции в общей теории волн, уникальность и фундаментальность их явлений, феноменология, известная в разных отраслях, а также ряд технологий. Эффекту отрицательного преломления (Л. И. Мандельштам, 1940-ые гг, Arthur Schuster, 1904), сверхфокусировке (суперлинзе В. Г. Веселаго, 1967), метаматериалам и нулям групповой скорости (ZGV, с 2000-ых) за рубежом и в России посвящено множество публикаций, тысячи статей и докладов, книги и выпуски журналов, конференции и совещания (см. Инет и др.). Дано ряд премий, наград и номинаций: В. Г. Веселаго, John Pendry, David Smith – [4,14]. Однако, кроме этих широко известных явлений и сенсационных приложений – суперлинза и сверхразрешение, «плащ-невидимки», «революция и столетие метаматериалов» и -поверхностей, «переворот в оптике» – вековая теория обратных волн накопила уже целый спектр не менее интересных и поразительных эффектов. Это антизеркальное отражение; инверсные эффекты Доплера и Черенкова; притяжение света и звука (в отл. от классического давления); извилины, петли и кресты сингулярной дисперсии; селективное затухание; трёхволновой радиоимпульс и другие явления и свойства. Их уникальность (так сказать, физическая сингулярность) предопределяется законом дисперсии, отрицательной фазовой скоростью (– *адирекцией*) и особыми точками – математической сингулярностью. В общем на сегодня ОВ-феноменология насчитывает уже ок. 50 положений, сгруппированных нами в 4 основных класса: кинематические, дифракционные, нелинейные и динамические (нестационарные и радиационные), а также акустоэлектроника. Однако ОВ-явления изучены весьма неравномерно, так акустоэлектронные эффекты всё ещё гипотетичны, а наиболее разработан дифракционный класс. Из успешных многолетних приложений укажем обратноволновую электронику (ещё с 1950ых гг, лампы-ЛОВ и др.), проекты

суперлинзы и скрытности в радиотехнике и оптике и бесшумности в акустике и вибромеханике. Заметим, что броский термин «плащ-невидимки» был естественно привнесён из сказки-в-жизнь, в оптику, а далее и в другие области, вкл. гидро-, производственную и архитектурную акустику и даже в вековую проблему виброизоляции машин. И сегодня тематика «плаща» стала флагманским трендом.

Один из ОВ-эффектов – развороты поля и диаграммы направленности, ДН, с её кратным сужением при преломлении и отражении, рассмотрен в нашем след. докладе [27]. Узкая ДН всегда востребована.

2. Обзор обратноволновой феноменологии. Обзор и анализ известных ОВ-явлений и свойств проведён в ряде наших статей и докладов [19–27 и др.]. Здесь мы кратко приводим отчасти и обзор, и новые данные. Ещё в 1982г [20] нами было выделено 4 группы ОВ-феноменологии. И эта классификация остаётся целесообразной и сегодня. 1) *Кинематические* свойства, порождаемые самой волной, её волновым фактором $\exp i(kx + \omega t + i\alpha x)$. 2) *Дифракционные* – это всевозможные дифракционные эффекты в ОВ-структурах, а также их геометрооптический предел, лучевое отражение, преломление и т.п. 3) *Динамические*, нестационарные и радиационные, явления при импульсных, переходных и случайных процессах и при движении объектов или элементов системы (судна на море, электрона, потока среды и пр.). И, 4) *нелинейные* мощные процессы и ОВ-явления, вкл. *акустоэлектронику*.

В электродинамике наиболее разработана тема метаматериалов, в механике – ОВ-мод Лэмба в пластине. В простой модели метаматериала и его стыка с диэлектриком, согласованного, *ОВ-адекватного*, эффективен формализм Веселаго:

$$\varepsilon_1/\varepsilon_2 = \mu_1/\mu_2 = -1; \quad n_{12} = \sqrt{(\varepsilon_1\mu_1/\varepsilon_2\mu_2)} = -1, \quad (1)$$

где ε_K и μ_K – диэлектрическая и магнитная проницаемости, n_{12} – коэффициент преломления. В механике такой простой модели нет [6,28,29 и др.], но физика вполне аналогична.

Определение 1. *Обратноволновые, вполне согласованные системы, ОВ-адекватные, это такие волновые двух или многомодовые структуры, имеющие границу раздела, где при разноимённом межмодовом преломлении коэффициент прохождения равен 1, а отражения 0. Разноимённое преломление (отражение и др. преобразования) – это падение*

прямой волны (ПВ), преломление (и др.) обратной или наоборот. Одноимённые – это ОВ-ОВ и ПВ-ПВ. Большинство ОВ-явлений разноимённые. В одноимённых преобразованиях ОВ-ОВ в целом нет уникальности и новизны, то же что и ПВ-ПВ. Разно- и одноимённые ОВ и ПВ во многом аналогичны таковым же электрич. зарядам, а разноимённое отражение – Андреевскому квантовому, электрон-дырка.

Т.о., кроме идеальных линзы и стыка со средой Веселаго, в электродинамике и механике имеется множество др. ОВ-адекватных систем. Например, волноводы и планарные структуры, неоднородные и разделённые магнитным полем (Зубков В. И. и др.).

2.1. Дифракционные эффекты. Эта область наиболее развита во многих мировых и отечественных центрах, в т.ч. и нашими коллегами. На рис. 1 три основных эффекта становления этой области; некоторые др. эффекты – в некой мере следствия из этих трёх. Идеи отрицательного преломления и фокусировки, рис. 1 а и б, с 2010/20 -ых гг. стали весьма актуальны и крайне популярны, в особенности в проблеме скрытности, «невидимки» [7,11,13,30,...], вплоть до высших премий – см. в п. 1. На слуху стали такие заголовки и обороты как «шапка- и плащ-невидимки», «революция», «век», «переворот».

Итак, при падении волны произвольного профиля

явлением обобщённой (неоднородной) ОВ. В) Неоднородные, антизеркально отражаемые моды в поглощающих системах. Г) Фокусировка при отражении выпуклых фронтов. Д) Сверхразрешение при преломлении и безабберационное (точечное) изображение. Е) Смещение и обужение лучей, пучков и диаграмм направленности. Ж) Анти-дифракция – элементы отрицательной инверсной дифракции при разноимённых преобразованиях на границах 2- и 3D-структур. И) Адирективное, инверсное и селективное излучение и приём ОВ-мод.

2.2. Кинематические свойства (краткие названия). Базисное свойство адирекции $V \cdot U < 0$. Б) Узкополосность и монизм ОВ, т.е. узкие и ограниченные сверху частотные спектры и одномодовая дискретность. В) Извилистые, квазипараболические законы дисперсии и дисперсионные кривые. Г) Узкие или ограниченные диапазоны существования по материальным параметрам систем. Д) Селективное высокое затухание ОВ-мод (по ср. с ПВ), с минимумом вблизи частоты перегиба извилины. Е) Явление обобщённой волны в поглощающих структурах. Ж) Низкочастотность обратных волн (по ср. с ПВ) и неустойчивость в ВЧ спектре; преобладание 1-ой НЧ ОВ. З) Малые групповые скорости и волновые числа ($\downarrow 0$) и большие длины волн и фазовые скорости ($\uparrow \infty$).

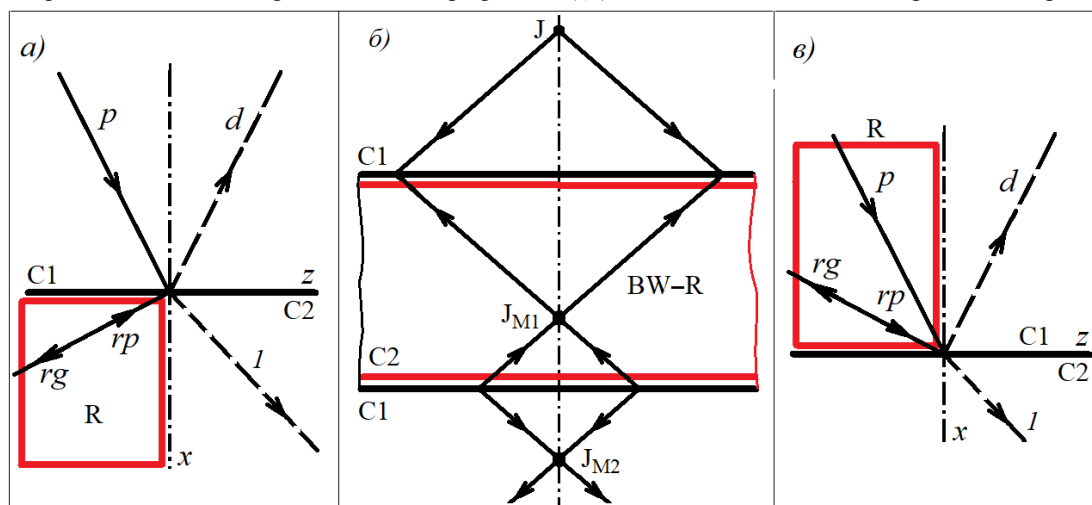


Рис. 1. Аномальные разноимённые преобразования ОВ-ПВ или ПВ-ОВ (в красных областях):

- А) Схема преломления; $C1$ и $C2$ – разноимённые среды или волноводы, плоские; p – падающий луч; l – обычное, одноимённое преломление; rp – отрицательный вектор фазовой скорости разноимённой моды, rg – положительный групповой луч, R – разноимённый красный квадрант отрицательного преломления; d – строго зеркальный луч.
- Б) Сверхфокусировка сферической или цилиндрической волны на слое-суперлинзе Веселаго (с обратной волной, BW – backward wave; стрелки – вектора фазовой скорости). Или – на разноимённой вставке в волноводе (R/BW – красный слой). J_{MK} – два мнимых транслятора-источника, концентрации и расхождения лучей.
- В) Антизеркальное отражение разноимённой моды, r – адирекция вектора её фазовой скорости; d – зеркальный одноимённый луч; l – преломленный одноимённый луч; R – разноимённый красный квадрант антизеркального отражения.

на границу разноимённых систем возможен целый ряд новых эффектов. В нашем смежном д-де [27] детально изучены развороты поля, би- и мульти-, косая и ортогональная инверсия, и формирование локально сверхтонкой ДН F_{2N} в периодических структурах, $F_{2n}(\theta) \sim F((2n+1)\theta)$, $n=1,2,3,\dots$

Список других дифракционных разноимённых явлений. А) Аномальное прохождение неоднородных плоских структур. Б) Аномальное преломление на границе поглощающих сред или плоских структур, с

2.3. Динамические явления, нестационарные и радиационные, (названия). 1) Обращённый эффект Доплера. 2) Аномальное, обращённое излучение Вавилова-Черенкова. 3) ОВ-излучение типа Маха в акустике и механике, родственное черенковскому. 4) Аномальное переходное ОВ-излучение в механике и электродинамике. 5-7) Аномальность других радиационных эффектов, тормозного, синхротронного, дифракционного (Парселла-Смита) – идеи и гипотезы. 8) Продольный волноводный резонанс при вы-

рождении ПВ- и ОВ-мод. 9) *Повышенная помехоустойчивость по сравнению с прямыми модами* – наша гипотеза. 10) *Трёхволновой цуг*, триплет, с головным фронтом на частоте перегиба; доминирование головного импульса, квазисолитона. 11-12) *Пространственное и частотное расщепление коротких импульсов при преломлении, отражении, излучении и дифракции*.

2.4. Нелинейные явления (названия). 1) *Генерация гармоник* при сверхфокусировке; излучение квазисферической (цилиндрической) 2-ой и др. гармоник 2) *Инверсия* волнового синхронизма при нелинейном взаимодействии с ОВ ($k_{ОВ} < 0$): $k_1 = k_2 \pm k_3$; $\omega_1 = \omega_2 \pm \omega_3$. 3) *Адирективное излучение нелинейно генерируемых, разноимённых гармоник и мод*. 4) *Отрицательный кинетический импульс* (электродинамическое и механическое представление). 5) *Световое притяжение*. 6) *Притяжение* упругих и звуковых ОВ. В частности, ультразвуковой и гидродинамический ОВ-воронка, *антифонтан*. 7-8) *Приливные*, акустические и гидродинамические ОВ-течения – наша гипотеза. 9) *Инверсная левитация* (гипот.) и передвижение тел. 10-11) *Инверсная пондеромоторика* ОВ-света и -звука (силы, действующие на тела): волновое увлечение (в отл. от отдачи), обратный эффект Садовского и др. гипотезы. 12) *Отрицательные моменты* углового и кинетич. импульсов – гипотеза. 13) *Аномальность* вынужденного комбинационного рассеяния.

3. ОВ-модификация и ревизия положений теории волн в механике и электродинамике. 1) *Модификация представлений о кинематике и природе волновых движений* $u(r,t) \approx A(r)f_0(t-r/U)\exp i\omega(t+r/V)$, $V \cdot U < 0$. 2) *Пересмотр* и модернизация законов преломления (и формул Френеля), отражения и прохождения. В основе – энергопотоки, вектор Умова-Пойнтинга или групповой скорости, а затем и фазовые скорости. 3) *Пересмотрен* принцип Ферма. 4) *Обобщение* понятия групповой и энергетической скоростей, леммы Лоренца и принципа взаимности. 5) *Эффекты* авто- и сверх-фокусировки расходящихся фронтов при разноимённых отражении, преломлении и дифракции на границах раздела. 6) *Элементы* разноимённой анти-дифракции в развитие теории дифракции. 7) *Отрицательный кинетический импульс* и связанные с ним явления. 8) *Развитие* принципов излучения, формулировка условий излучения и корректности волновых задач и математ. моделей. 9) *Пересмотр* других эффектов и закономерностей волновой физики в плане ОВ-кинетики (эффекты Доплера, Маха и др. – п. 2). Этот перечень должен быть продолжен, т.к. *систематической теории обратных волн* всё ещё не создано.

4. Технологические перспективы. В радиоэлектронике традиционно успешны две крупные отрасли: 1) *ОВ-ая СВЧ электроника*, Лампы–ЛОВ, амплитрон и др., с 1950-ых гг.; 2) *Радиоантенны* на обратных волнах, с 1960-ых. На сегодня известны также след. внедрения. А) *Акустич. ОВ-уровнемер* – Дюдин Б. В., Рохлин С. И. 1970-ые, [в 19]. Б) *Супер-*

линза Веселаго. Г-Ж) *Проекты скрытности*, невидимости и бесшумности в оптике, радио- и гидро-локации и виброизоляции. 3) *Ультразвуковой микродвигатель* на обратных (как и на прямых) бегущих модах в пластинке [в 19]. И) *Фотонный резонатор Энгета* (N. Engheta [в 19]). И открытый микро-резонатор [31]. К) *Кольцевой лазерный гироскоп* [32]. Л) *Линейные ОВ-ускорители* [33]. М) *ZGV-технологии*, нулей групповой скорости, [26 и мн. др.]. Н) «Акустический пинцет» [34], ср. с 3. А также всевозможные *инверсные приборы и устройства*, электронные, оптические и акустические. Это классическая линза (в отл. от предыд. п. Б), призма, концентратор, рефлектор, излучатель (и приёмник, преобразователь) [в 19 и др.]. Оптические наноантенны и нанолазеры [35]. И мн. др. уже действующие приборы и макеты или проекты и гипотезы. Наконец, недавно сформировавшиеся области мета-устройств и *трансформаций* [3,10,...].

5. Обратноволновая концепция. *Суть обратноволновой концепции:* 1) *базовое свойство адирекции*, 2) *широкий спектр уникальных фундаментальных ОВ-явлений и свойств*, 3) *модификация ряда физических эффектов и представлений* и 4) *перспективные ОВ-технологии*.

6. Заключение. Обратноволновой тренд ведёт к открытию новых и модификации известных волновых эффектов. А широкая ОВ-феноменология служит фундаментом для новых технологий, уже созданных и перспективных. Решающий вклад в развитие физической теории обратных волн внесла отечественная наука, начиная с Л. И. Мандельштама и В. Е. Пафомова. Затем идут советские электронщики, группа теоретиков ФИАНа (1950-ые) и многие современные коллеги. Это В. М. Агранович, С. Е. Банков, Ю. И. Бобровницкий, С. В. Кузнецов, И. Я. Кучеров, А. Н. Лагарьков, Э. Г. Локк, В. В. Мелешко, В. Г. Можаяев, Р. А. Силин, Т. М. Томилина, В. В. Фисанов, В. В. Шевченко, В. И. Щеглов и многие другие. См. также список публикаций. Мы говорим об обратноволновой концепции, однако всякую новую концепцию принимает и развивает научное сообщество, а не отдельный автор или круг специалистов.

1. Авербух Б.Б., Авербух И.Б.// Изв ВУЗов. Физика. 2021. Т. 64. № 5 (762). С. 116.
2. Farhad Zeighami, Antonio Palermo, Alessandro Marzani.// Internat. J. Mechanical Sciences. 2021. V. 195. 106250.
3. Грейсух Г.И., Данилов В.А., Ежов Е.Г., Антонов А.И. (Обзор)// Автотестирование. 2020. Т. 56. № 2. С. 5.
4. Памяти В.Г. Веселаго// УФН. 2019. Т. 189. № 3. С. 336.
5. Fuyin Ma, Jianyu Chen, Jiu Hui Wu.// Journal of Materials Chemistry C. Apr. 2019. DOI: 10.1039/C9TC01243E.
6. Акустические метаматериалы/ Секция на сессии РАО-2019. Руков. Бобровницкий Ю.И., Миронов М.А. М.: АКИН, 2019.
7. Бобровницкий Ю.И., Томилина Т.М. (Обзор)// Акуст. ж. 2018. № 5. С. 517.
8. Бырдин В.М., Косарев О.И., Пузакина А.К.// Динамика систем, механизмов и машин, 2018. Т. 6. № 1. С. 27.
9. Legrand F., Gérardin B., Jérôme L., Prada C., Aubry A.// Phys. Rev. 2018. B 98. 214114.
10. Drachev V.P., Fedotov V., Shadrivov I. // JOSA B: Opt. Ph. 2017. V. 34. N 7.

11. Алексеев Г.В. Проблема невидимости в акустике, оптике и теплопереносе. Владивосток: Дальнаука, 2016. 224 с.
12. Yan S., Lomonosov A.M., Shen Z.// J. Appl. Phys. 2016. V. 119.
13. Acoustic metamaterials: negative refraction, imaging, lensing and cloaking/ Eds. Craster R.V., Guenneau S. Dordrecht: Springer, 2013. 323 p.
14. Атжанов Равиль// В мире науки. 2012. № 4. С. 76.
15. Дубинов А.Е., Мытарева Л.А.// УФН. 2012. Т. 182. № 3. С. 337.
16. Special Issue on Cloaking / Ed. by A.N. Norris// Wave Motion. 2011. V. 48, Is. 6.
17. Слюсар Вадим. (Обзор)// Электроника: наука, технология, бизнес. 2009. № 7. С. 70.
18. Deymier P.A., Merheb, B., Vasseur J.O., Sukhovich, A., Page J.H.// Rev. Mex. Fis. 2008. V. 54. P. 74.
19. Бырдин В.М. (Обзор)// Радиотех. и эл. 2005. № 12. С. 1413.
20. Бырдин В.М.// 28-я науч. конф. ТРТИ. Таганрог, 1982. С. 48.
21. Бырдин В.М.// Акустика неоднородных сред: Труды семинара АКИН. М., 2002. С. 112.
22. О серии работ В.В. Шевченко по теории обратных волн // Московский электродинамич. семинар. М., ИРЭ РАН / Бырдин В.М. Ред. С.А. Никитов. М.: ИРЭ РАН, 2007. 28 с.
23. Бырдин В.М. Мамонова М.Г.// Проблемы машиностроения и автоматизации. 2011. № 1. С. 81.
24. Бырдин В.М.// XI Всерос. съезд по фундамент. проблемам теор. и прикл. механики/ Сб. докл. Казань: КФУ, 2015. С. 656.
25. Бырдин В.М. // Изв. РАН. Механика твердого тела. 2017. № 3.
26. Byrdin V.M.// IX Internat. Conf. The problems of interaction of deformable media, dedicated to the 75th anniversary of NAS RA. Oct. 2018, Goris, Armenia. Ереван, 2018. С. 87.
27. Бырдин В.М., Пузакина А.К.// Даннаяя Конф. 2021.
28. Zhengwei Li, Chen Wang, Xiaodong Wang// Intern. J. of Solids and Structures. 2019. V. 162. P. 271.
29. Joo Hwan Oh, Hong Min Seung, Yoon Young Kim// J. of Sound and Vibration. 2017. V. 410. P. 169.
30. Веселаго В.Г. Лекция// ACADEMIA. ТВ Культура. 12.6.2013.
31. Семёнов А., Смирнов А., Игнатъева Д., Сухоруков А.// Изв. РАН. Серия физич. 2011. Т. 75. № 12. С. 1741.
32. Веселаго В.Г., Дианов Е.М., Курятов В.Н. и др.// Квант. эл. 2016. № 6. С. 543.
33. Богомолов А.С.// Семинар НИЦ "Курчатовский институт", "Физика ядерных реакторов". 18.10.2013.
34. Feng Guoa, Zhangming Maoa, Yuchao Chena and etc.// Proc. of the NAS USA. Current Issue. V. 113. N. 6. P. 1522.
35. Вольпян О.Д., Кузьмичёв А.И. Отрицательное преломление волн. Введение в физику и технологию электромагнитных метаматериалов. К.-М.: Аверс, 2012. 360 с.
36. Анненков А.Ю., Герус С.В., Локк Э.Г.// Электроника и микроэл. СВЧ. 2016. Т. 2. № 1. С. 20.
37. Басанова В.В., Атутов Е.Б., Ломухин Ю.Л. и др.// Изв. вузов. Физика. 2017. Т. 60. № 12-2. С. 37.
38. Meleshko V.V., Bondarenko A.A., Dovgiy S.A. and etc.// J. of Mathematical Sciences. 2009. V. 162. № 1. P. 99.
39. Glushkov E., Glushkova N.// J. Sound and Vibration. 2021. 500. 116023. 10.1016/j.jsv.2021.116023.
40. Федотова М.А., Петросян А.С.// ЖЭТФ. 2020. № 6. С. 1188.
41. Фисанов В.В.// Изв. вузов. Физика. 2018. Т. 61. № 6. С. 114.
42. Шавров В.Г., Щеглов В.И. Магнитостатические и электромагнитные волны в сложных структурах. М.: ФМЛ, 2017. 360 с.
43. Щелокова А.В. Мельчакова И.В., Белов П.А. и др.// УФН. 2015. № 2. С. 181.
44. Шевченко В.В.// УФН. 2011. 181. № 11. С. 1171.
45. Rokhlin S.I.// JASA. 1981. V. 68. N 4.
46. Басанова В.В., Атутов Е.Б., Ломухин Ю.Л. и др. // Изв. вузов. Физика. 2017. № 12-2. С. 37.

ДВОЙНЫЕ И КРАТНЫЕ, КОСЫЕ И ОРТО- РАЗВОРОТЫ ВОЛНОВОГО ПОЛЯ И НАПРАВЛЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ОБРАТНОВОЛНОВЫХ СИСТЕМАХ

В.М. Бырдин, А.К. Пузакина

Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва, Россия; V_M_Byrdin@mail.ru

Аннотация. Исследуется обратноволновое отражение, прохождение и дифракция на границах разноимённых структур (разномодовых, когда слева от стыка обратная волна, а справа обычная, прямая или наоборот). Механизм инверсии, разворотов, поля и, в частности, диаграммы направленности связан с отрицательным преломлением (или отражением) и фокусировкой преломленного (отраженного) поля. При дублировании идентичных, вполне согласованных стыков достигимы мульти-инверсия, многократное сужение главного лепестка и др. результаты.

Введение. Обратные волны – возродившееся с 2000-ых гг., фундаментальное креативное направление в теории волн и технологий, идущее от Горакса Лэмба (1904г), Артура Шустера (1909), Л. И. Мандельштама (1940) и других авторов и развитое советскими, российскими и зарубежными коллегами 2-ой пол. 20-го и 21 веков [1–5 и др.]. Феноменология обратных волн довольно широка, фундаментальна и поразительна. Достаточно назвать такие яркие эффекты, как сверхфокусировка плоским слоем (линзой Веселаго или волноводной вставкой), антизеркальное отражение (В. М. Бырдин, 1983), притяжение света и звука (в отл. от классического давления; В. Г. Веселаго, 1967), обращённое излучение Черенкова и Маха [2] и т.д. Из успешных эффективных приложений укажем обратноволновую электронику (ещё с 1950ых гг, лампы-ЛЮВ и др.), проекты суперлинзы и скрытности в радиотехнике и оптике и бесшумности в акустике и вибромеханике. За этими открытиями с 2000-ых гг. последовали научно-технические тренды и бумы публикаций о сверхразрешающей линзе, «плаще-невидимке» и «революции метаматериалов» и метаповерхностей, ряд наград и премий вплоть до высших номинаций [В. Г. Веселаго, Дж. Б. Пэндрю, Д. Р. Смит] [3–12].

Заметим, броский термин «плаща-невидимки» был естественным образом привнесён из сказки-в-жизнь, в оптику, а далее и в другие области теории волн и технологий, вкл. гидро-, архитектурную и производственную акустику и даже в вибро-изоляцию машин. И сегодня тематика «плаща или шапки» стала флагманской в науке.

Один из интересных и красивых обратноволновых (ОВ-) эффектов – двойной разворот, биинверсия диаграммы направленности (ДН) при преломлении на плоской границе (см. ниже рис. 3) – был предсказан нами в 2004г [2], а позже строго доказан и рассчитан для стыка «отрицательной» среды (мета-материала) и диэлектрика («+» среды) и для волноводных систем [13]. Кроме того, в наших работах строго решено несколько задач по данной и смежной дифракционной тематике. Это электромагнитные волны в киральной и отрицательной средах; акустические лэмбовские моды; нагруженная упругая пластинка; узкие параксиальные и гауссовы пучки. Для

электромагнитных волн произвольного профиля (сферических, цилиндрических, иных криволинейных фронтов и волновых пучков) доказано, что коэффициенты отражения и прохождения на стыке вполне согласованных сред равны, соотв., 0 и 1 (см. п. 1.2) (см. в [13]). Т.е. полная прозрачность границы, при этом поле получает два точных разворота, *биинверсию*, за границей раздела сред и за плоскостью мнимого источника (см. ниже рис. 2).

В работе доказана также *мульти-инверсия*, многократные развороты, волнового поля в периодических системах, с чередованием разноимённых, вполне согласованных (ОВ-адекватных) сред или структур. Акустическая мульти-инверсия реальна на базе лэмбовских волн – рис. 1б.

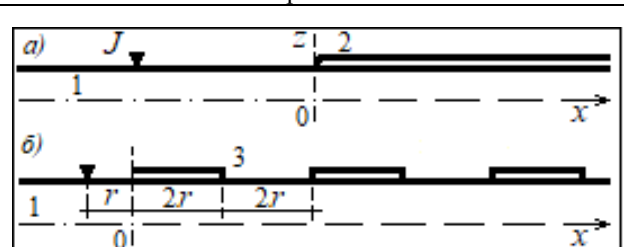


Рис. 1. Примеры плоских обратноволновых структур на базе пластины, реализующих разноимённые развороты волнового поля – продольный разрез (по zOx). а) Для биинверсии; б) для мультиинверсии. Падение пучка или волнового фронта справа, J – излучатель (в точке $x_J = -r$). 1 – пластина; 2 – накладка (слой); 3 – полоска, $4r$ – шаг периодической системы. Штрих-пунктир и штрих – ось симметрии или граница пластины в несимметричной структуре.

1. Разворот и биинверсия на границе разноимённых сред. В простой модели стыка метаматериала и диэлектрика, вполне согласованных, ОВ-адекватных, эффективен формализм Веселаго:

$$\varepsilon_1/\varepsilon_2 = \mu_1/\mu_2 = -1; \quad n_{12} = \sqrt{(\varepsilon_1\mu_1/\varepsilon_2\mu_2)} = -1, \quad (1)$$

ε_k , μ_k – диэлектрическая и магнитная проницаемости, n – коэффициент преломления.

Определение 1. Обратноволновые, вполне согласованные системы, *ОВ-адекватные*, это такие волновые двух или многомодовые структуры, имеющие границу раздела, где при разноимённом межмодовом преломлении коэффициент прохождения равен 1, а отражения 0. Разноимённое преломление (отражение) – это падение прямой волны, прелом-

ление (отражение) обратной или наоборот.

Так что кроме идеальных линзы и стыка со средой Веселаго, в электродинамике и механике имеется ряд других ОВ-адекватных систем. Например, наши неоднородные волноводы [17] или планарные, разделённые магнитным полем (Зубков В. И. – в [2]).

Пусть на границу раздела таких сред (1) падает волна произвольного профиля, тогда – теорема 1.

1.1. О разворотах и бинверсии разноимённо преломленного поля в среде Веселаго

Теорема 1 (о разворотах и фокусировке поля).

При падении волнового фронта на плоскую границу ОВ-адекватных сред, разноимённое преломленное поле испытывает идеальное прохождение, точечную фокусировку и развороты волнового поля, дублируя исходное падающее поле.

Для доказательства теоремы – лемма 1.

Лемма 1 (О полной прозрачности). Для ОВ-адекватных сред (1) коэффициенты отражения и прохождения R плоской границы раздела равны, соотв., 0 и 1 для волн любого профиля, плоских, сферических, цилиндрических, направленных излучений, пучков и т.д.

Доказательство – см. [13]. В точках мнимых источников, основной лепесток ДН описывает «8-ку», точнее « ∞ », симметрично плоскостям источников. Но в силу диссипативных потерь и мощных излучений, с фокусировкой и нелинейными эффектами, реализуется размытая инверсия. Отсюда $R \approx 1$.

Следствие 1. Преломленное поле испытывает следующие трансформации.

1) Идеальное прохождение, точечную фокусировку, разворот и дублирование – инверсию.

Или 2) при выпуклом падающем фронте, двойное дублирование, бинверсию, исходного поля с разворотами профиля по 180° . Коэффициент прохождения $R(\theta) \uparrow 1$, ~ 1 , ≈ 1 . 1-ый разворот зеркально от границы раздела, 2-ой – зеркально фокальной плоскости с мнимым источником. ($\sim$ – асимптотич. равно).

3) Падающая сходящаяся волна испытывает только один разворот после преломления, дефокусируется, зеркально повторяет падающее поле и расходится на бесконечность.

4) В случае направленного ортогонального излучения, характеристика направленности также дважды разворачивается. И в зонах 1-го и 2-го разворотов общая диаграмма направленности (считая от исходного излучателя) дважды и трижды локально сужается. Но на бесконечности эффект сужения снимается.

5) При косом падении и докритических углах θ , косая бинверсия реализуется по законам отрицательного преломления и анти-зеркального отражения лучей.

6) Все указанные явления действительны не только на предельно коротковолновых волнах, но и на любых частотах: строгий анализ в точности совпадает с результатами геометро-оптического, лучевого метода.

Как иллюстрация результатов теоремы и след-

ствия 1 – см. след. частные случаи на рис. 2–5 и след. п. 1.2. Кроме того, в подтверждение – наше точное решение дифракционной задачи в [17].

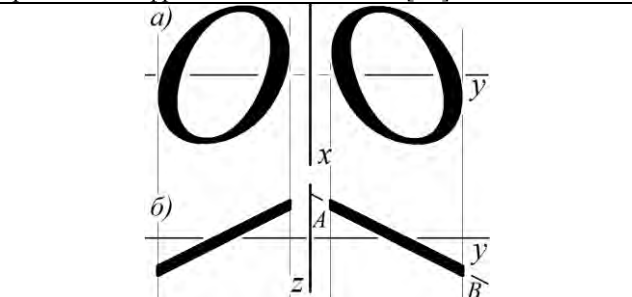


Рис. 2. а) Разворот изображения «О» после границы раздела ОВ-адекватных сред. Для теневых (заднего плана) элементов – z-сканирование. б) А–В-проекция объекта О на zOy.

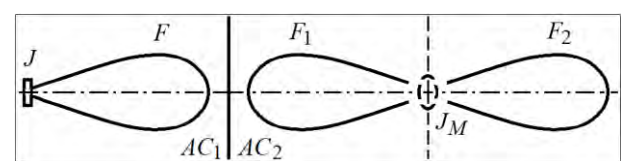


Рис. 3. Бинверсия главного лепестка диаграммы направленности $F(\theta)$. $F_k(\theta)$, $k=1,2$ – в 1-ой и 2-ой зонах в AC_2 -среде. AC_k – ОВ-адекватные среды. θ – угол от оси излучателя J или от мнимого J_M .

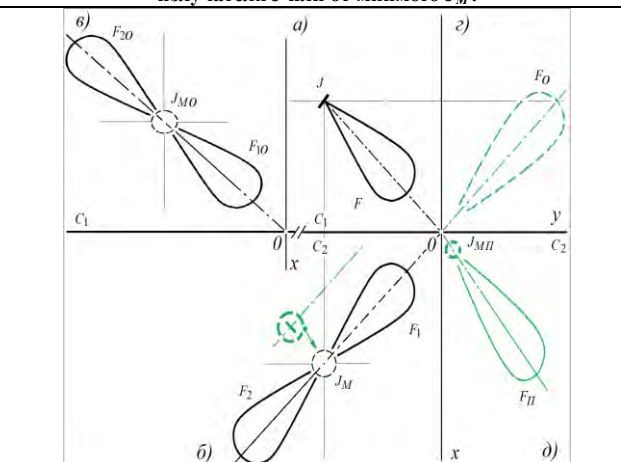


Рис. 4. Косая бинверсия главного лепестка диаграммы направленности при ОВ-адекватном преломлении (а-б). Или при отражении (в). Угол падения (по оси излучения и по всем др. лучам) равен углу преломления (б) и одноимённого отражения (в).

1.2. Обычное расхождение, но разноимённая бинверсия гауссова пучка. Строгое решение этой задачи дано в нашей статье [13]; приведём здесь только результат. Осесимметричный излучатель $E = u \exp i(-kx - \omega t)$, $u(-x_j, r) = \exp(-r/2a^2)$, $a\sqrt{2}$ – квазирадиус. В оптическом (коротковолновом – КВ, высокочастотном – ВЧ) приближении, $ka \gg 1$, также как и для прямоволнового пучка [14, с. 462; 15, с. 264] ОВ-пучок описывается параболическим уравнением: $u(x, r) = f(x) \exp(-ikr^2/2\chi^2)$; $\chi^2 = x + x_j + ika^2$; $f(x) = ika^2/\chi^2$. Для обратной волны данное решение получено впервые. Цилиндрическая симметрия – аналогична данному, сферическому, и отчасти переносится на плоские волноводы. При падении гауссова цилиндрического ОВ-пучка из отрицательной среды на диэлектрик, преломленный ПВ-пучок запишется:

$u(S,P)=f_0 f_2 \exp(-P^2 f_2^2/2)$; $f_2=(1+iS)^{-1/2}$; $P=y/a_2$; $S=x/\sigma_2$; $a_2=ka_2$; $a_2=a/f_0=a(1-is_0)^{1/2}$; $s_0=x_j/\sigma a>0$. Здесь также получаем биинверсию – см. [13] и рис. 3.

2. Биинверсия нормальных волн в пластине на неоднородности. Пусть волна Лэмба цилиндрического или направленного профиля нормально падает на границу полубесконечной накладки – рис. 1а. Накладкой может быть утолщение, плёнка, жидкость и т.п. В результате возникают спектры мод криволинейного профиля, отражённых, лэмбовских, и прошедших нормальных (собственных) волн. Такого рода задачи решены в [7,16,17 и др.].

Расходящееся поле точечного, в частности, излучателя после преломления разномодной модой будет фокусироваться в пятно, в идеале, в точку. Например, при падении цилиндрической осесимметричной моды Лэмба, описываемой функцией Ганкеля $H_0^{(2)}$, преломленная мода аппроксимируется как квазцилиндрическая, но кососимметричная (см. в [13,17]): $u \approx A(z)H_0^{(2)}(s)\exp(i\omega t)$, $s=\pm kr_{np}$, $r_{np}=\sqrt{(y^2+(x-x_j)^2)\text{sign}(x_j-x)}$. + для обратной преломленной моды, – для прямой; sign – функция знака. Такой же источник-«сток» в [18]. При $s \rightarrow \infty$ – асимптота цилиндрической волны: $H_0^{(2)} \sim s^{-1/2} \exp(-is)$. Этим же методом строится аппроксимация двойного разворота ДН $F(\theta)$ на границе раздела сред или плоских волноводов: $u \sim A_0 R(\theta) F(\theta) H_0^{(2)}(s) \exp(i\omega t)$, $R(\theta) \approx R(0)$, $\theta \sim y/x_j \ll 1$. $R(\theta)$ – френелевский коэффициент прохождения. Точный расчёт $R(0)$ для пластины, погруженной в сосуд, дан в [17]; для $\theta > 0$ применим также метод работы [16]. При косом падении, с докритическими углами, развороты реализуются по направлению отражательного преломления.

3. Мультиинверсия поля и сверхузкая диаграмма направленности в обратноволновых периодических структурах. В такой системе на базе двух ОБ-адекватных сред (рис. 1, б) получим повторение двойного разворота, бумеранг или мультиин-

версия сверхузкой ДН и сверхдальней передачи сигнала, что актуально в антенной технике.

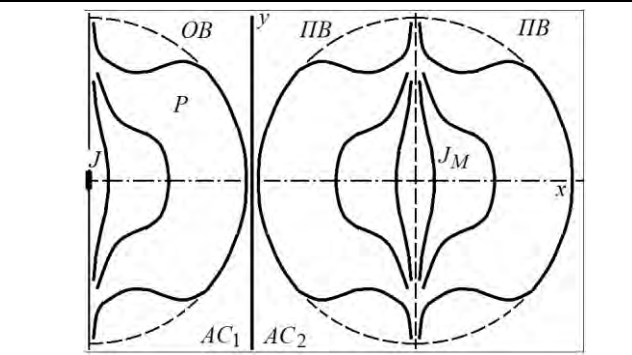


Рис. 5. Эволюция и биинверсия изофаз гауссова пучка P , разномодно преломленного на границе ОБ-адекватных сред, AC_1 и -2 . P – падающий пучок; J_M – мнимый источник и суперфокус (в точке $y=0, x=x_{JM}$); $OB-ПВ, \longleftrightarrow$, или $ПВ-OB, \rightarrow \leftarrow$, – фазовые движения.

Закключение. Изучена группа обратноволновых дифракционных эффектов – развороты преломленного и отражённого полей и, в частности, характеристики направленности при стыковке вполне согласованных, разномодных сред или планарных и плоских волноводов. Для периодических систем из таких элементов доказана многократная инверсия. Эффекты сохраняются и при косо падающем поле

1. Грейсух Г.И., Данилов В.А., Ежов Е.Г., Антонов А.И. (Обзор)// Автометрия. 2020. Т. 56. № 2. С. 5.
2. Бырдин В.М. (Обзор)// Радиотех. и эл. 2005. № 12. С. 1413.
3. Слюсар Вадим. (Обзор)// Электроника: наука, технология, бизнес. 2009. № 7. С. 70.
4. Special Issue on Cloaking / Ed. by A.N. Norris// Wave Motion. 2011. V. 48, Is. 6.
5. Deymier P.A., Merheb, B., Vasseur J.O., Sukhovich, A., Page J.H. // Rev. Mex. Fis. 2008. V. 54. P. 74.
6. Drachev V.P., Fedotov V., Shadrivov I. // JOSA B: Opt. Ph. 2017. V. 34. N. 7.
7. Legrand F., Gérardin B., Jérôme L., Prada C., Aubry A. // Phys. Rev. 2018. B 98. 214114.
8. Fuyin Ma, Jianyu Chen, Jiu Hui Wu. // Journal of Materials



Рис. 6. Мульти-инверсия диаграммы направленности (обозначения – см. рис. 2).

версию поля и диаграммы направленности – рис. 6. В точках мнимых J_{MK} , главный лепесток ДН описывает «∞» (8-ки), симметрично плоскостям этих источников (штрих-линии); на стыках сред – приближенные 8-ки. В целом характеристика направленности обостряется, хотя и локально, в пределах периодической системы; за её пределами и на бесконечности сужение вырождается. Система из n стыков даёт $2n$ разворотов поля и $2n+1$ кратное обострение ДН на конце системы: $F_{2N}(\theta) \sim F((2n+1)\theta)$ – здесь угол от исходного излучателя J . Для оценки ДН в зонах нечётных разворотов приемлемо: $F_{2N-1}(\theta) \approx F(2n\theta)$. Т.о., имеются предпосылки для формиро-

- Chemistry C. Apr. 2019. DOI: 10.1039/C9TC01243E.
9. Yan S., Lomonosov A.M., Shen Z. // J. Appl. Phys. 2016. V. 119.
10. Бобровицкий Ю.И., Томилина Т.М. (Обзор)// Акуст. ж. 2018. № 5. С. 517.
11. Дубинов А.Е., Мытарева Л.А. // УФН. 2012. Т. 182. № 3. С. 337.
12. Памяти В.Г. Веселаго// УФН. 2019. Т. 189. № 3. С. 336.
13. Бырдин В.М., Косарев О.И., Пузакина А.К. // Динамика систем, механизмов и машин, 2018. Т. 6. № 1. С. 27.
14. Ахманов С.А., Никитин С.Ю. Физическая оптика/ 2 изд. МГУ–Наука. М., 2004.
15. Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. Теория волн. Наука. М., 1979.
16. Rokhlin S.I. // JASA. 1981. V. 68. N 4.
17. Бырдин В.М. // Изв. РАН. Механика твердого тела. 2017. № 3.
18. Шевченко В.В.// УФН. 2011. Т. 181. № 11. С. 1171.

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ МЕХАНИЗМОВ СХВАТОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ С УЧЕТОМ СИЛ ТРЕНИЯ И СИЛ ИНЕРЦИИ

Е.И. Воробьев¹, Е.Е. Конева¹, К.О. Моргуенко²

¹Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия;

²Российский технологический университет «МИРЭА», Москва, Россия

В работе рассмотрена задача обеспечения удерживания объекта в схвате промышленного робота при наличии жестко незафиксированных возможных перемещений. Для удерживания объекта используются силы трения. Получены условия удерживания для плоских и цилиндрических деталей с учетом внешних сил и сил трения. Показаны силы инерции, действующие на объект для робота, работающего в цилиндрической системе координат.

Ключевые слова: манипуляционная система, программное относительное движение, рабочее звено.

Введение

Для плоских и цилиндрических деталей при их захвате за плоскую или цилиндрическую поверхность остаются не полностью зафиксированными некоторые возможные перемещения детали относительно схвата. Это может привести к выпадению детали из схвата и аварийным ситуациям.

Деталь в этом случае может удерживаться силами трения в точках контакта схвата с поверхностью детали. В общем случае на объект действуют усилия, зависящие от выполняемых технологических операций, силы трения в точках контакта детали со схватом и силы инерции, зависящие от движения схвата роботом.

При захвате плоской детали остаются незафиксированными возможные линейные перемещения в плоскости касания и угловое перемещение вокруг оси перпендикулярной этой плоскости.

При захвате детали за цилиндрическую поверхность остаются незафиксированными перемещения вдоль оси цилиндра и вращение вокруг этой оси.

1. Условия удерживания плоской детали в схвате робота

При захвате плоских деталей обычно используются схваты, губки которых совершают поступательные относительные движения.

Наиболее простой моделью для получения условий удерживания является модель с одной неподвижной губкой схвата, когда принимают, что одна губка схвата неподвижна, а другая совершает относительно её поступательное движение и действует на неё силой Q [1].

Будим считать также, что губка схвата и деталь контактируют в трёх точках A_1, A_2, A_3 .

Примем следующие координаты точек касания по граничным точкам схвата *рис.1*.

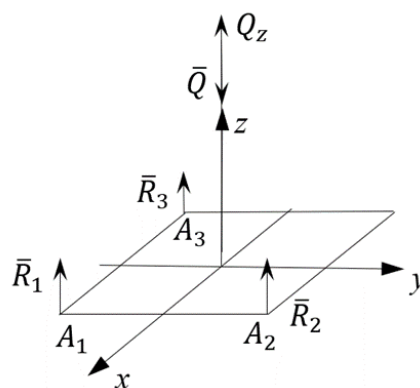


Рис. 1.

$$\begin{aligned} [A_1] &= [b, -a, 0]^T \\ [A_2] &= [b, a, 0]^T \\ [A_3] &= [-b, -a, 0]^T \end{aligned} \quad (1.1)$$

Из уравнений моментов сил относительно оси проходящей через точки A_1 и A_3 получим

$$\begin{aligned} R_2 2a + M_x - Q \cdot a &= 0 \\ R_2 &= \frac{Q}{2} - \frac{M_x}{2a} \end{aligned} \quad (1.2)$$

Из уравнений моментов сил относительно оси проходящей через точки A_1 и A_3 получим

$$\begin{aligned} R_3 2b + M_y - Q \cdot b &= 0 \\ R_3 &= \frac{Q}{2} - \frac{M_y}{2b} \end{aligned} \quad (1.3)$$

Из уравнения суммы проекций сил на ось OZ получим

$$\begin{aligned} R_1 + R_2 + R_3 - Q - Q_x &= 0 \\ R_1 &= \frac{M_x}{2a} + \frac{M_y}{2b} - Q_x \end{aligned} \quad (1.4)$$

Для жесткого фиксирования плоской детали необходимо, чтобы при действии на нее внешних сил реакции в точках контакта не обращались в ноль.

При равенстве нулю реакции R_2 и R_3 из (1.1) и (1.2) получим два условия жесткого фиксирования по двум координатам:

$$\begin{aligned} Q_2 &\geq \frac{M_x}{2a} \\ Q_3 &\geq \frac{M_y}{2b} \end{aligned} \quad (1.5)$$

Входящая в выражение (1.3) проекция силы Q_x с учётом (1.1) и (1.2) обращается в нуль тождественно.

Следовательно, при направлении силы Q строго по оси OX все реакции в трех точках контакта не обеспечиваются.

2. Условия удерживания плоской детали по не зафиксированному жестко возможным перемещениям

При захвате детали по плоской поверхности остаются жестко не зафиксированы возможные перемещения в плоскости касания и поворот вокруг оси нормальной к этой плоскости.

Эти возможные перемещения могут быть зафиксированы с помощью сил трения путём создания необходимой величины усилия зажима детали. Определим величину этого усилия. Для этого применим расчетную схему, показанную на рис. 2.

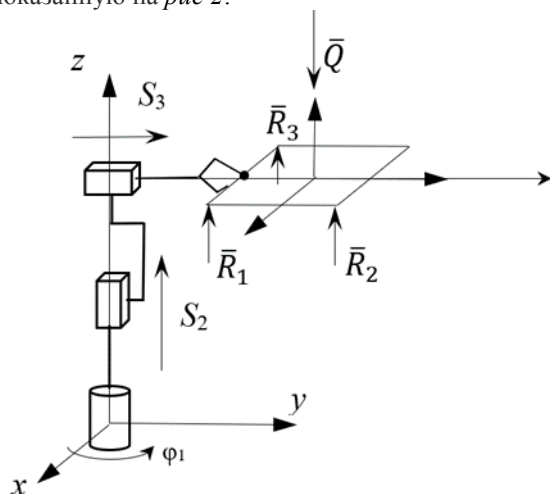


Рис. 2.

Будим считать, что в точках контакта A_1, A_2, A_3 возникают при сдвиге силы трения, расположенные в плоскости касания детали и элементов схвата и пропорциональные нормальным реакциям R_1, R_2, R_3 .

Эти силы трения имеют виртуальный характер и действуют в направлении противоположном направлению возможного относительного сдвига точек касания. В свою очередь, направления относительного сдвига точек касания можно приближенно считать совпадающими с направлением равнодействующей внешних сил, действующих на деталь.

Для случая выполнения роботом только переносного движения внешними силами можно считать только силы инерции детали.

С учетом этих допущений составим уравнения равновесия детали под действием сил

трения и сил инерции по незафиксированным координатам, получим

$$\sum_{i=1}^3 f R_i \cos \alpha = m a_x \quad (2.1)$$

$$\sum_{i=1}^3 f R_i \sin \alpha = m a_y \quad (2.2)$$

$$\sum_{i=1}^3 f R_i y_i \cos \alpha_i - \sum_{i=1}^3 f R_i x_i \sin \alpha_i = I_z \ddot{\phi}_1 \quad (2.3)$$

где f - коэффициент трения, α_i - углы между направлениями сил трения в точках контакта и осью OX , R_i ($i = 1, 2, 3$) - реакции в точках контакта детали с элементами схвата, m - масса детали, I_z - момент инерции детали относительно оси параллельной оси поворота робота.

При выполнении роботом только транспортных операций эти проекции можно считать равными нулю.

Ввиду малости размера схвата по сравнению с размерами робота можно считать угол $\alpha_i = \alpha$ и определять его по формуле

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{F_y^n}{F_x^n} \quad (2.4)$$

где F_y^n, F_x^n - проекции силы инерции детали на оси OX и OY .

В этом случае для робота, работающего в цилиндрической системе координат, получим

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{r \dot{\phi}_1^2 + \ddot{S}_3}{r \ddot{\phi}_1} \quad (2.5)$$

где r - расстояние от оси поворота робота до центра схвата, $\dot{\phi}_1, \ddot{\phi}_1$ - угловая скорость и угловое ускорение поворота робота, $\ddot{S}_3$ - ускорение выдвижения руки робота.

Из уравнений (2.1), (2.2), (2.3) получим условия фиксирования силами трения незафиксированных жестко возможных перемещений для плоских деталей.

$$Q_1 \geq \frac{m a_x}{f \cos \alpha} \quad (2.6)$$

$$Q_2 \geq \frac{m a_y}{f \sin \alpha} \quad (2.7)$$

$$Q_3 \geq \frac{I_z \ddot{\phi}_1}{f h_i} \quad (2.8)$$

Для полного фиксирования плоской детали в схвате робота из усилий прижима определяемых формулами (1.4), (1.5), (2.6), (2.7), (2.8) выбирается максимальное и соответствующее условиям внешних сил действующих на деталь.

3. Фиксирование цилиндрических деталей в схвате робота

Рассмотрим равновесие цилиндрической детали, опирающейся на вилкообразную опору и прижимаемую к опоре силой Q действующей по оси OZ рис. 3.

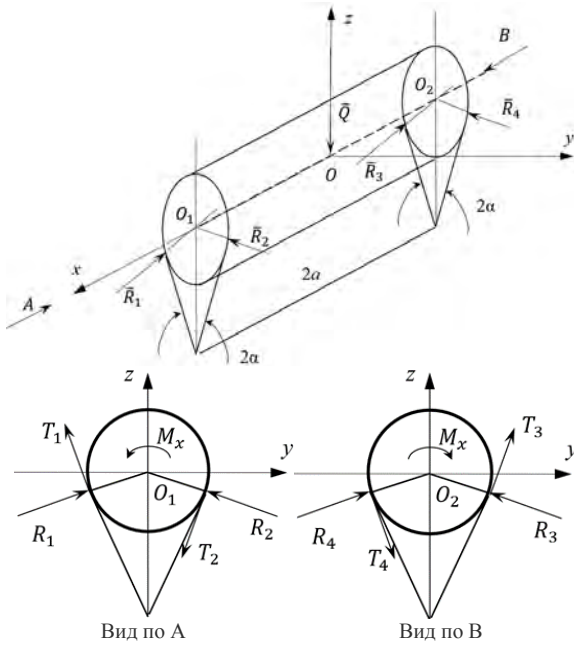


Рис. 3.

Составим уравнение суммы проекций сил на оси ОУ и ОZ

$$(R_1 + R_2 + R_3 + R_4) \sin \alpha - F_z - Q = 0 \quad (3.1)$$

$$(R_1 - R_2 + R_3 - R_4) \cos \alpha + F_y = 0 \quad (3.2)$$

где R_1 - реакция связей в точках контакта, F_y и F_z - проекции внешних сил на оси ОУ и ОZ. Откуда получим:

$$(R_1 + R_3) = \frac{f_1 + f_2}{2} \quad (3.3)$$

$$(R_2 + R_4) = \frac{f_1 - f_2}{2} \quad (3.4)$$

где $f_1 = \frac{Q - F_z}{\sin \alpha}$; $f_2 = -\frac{F_y}{\cos \alpha}$

Составим уравнение моментов сил относительно осей ОУ и ОZ, получим

$$(R_1 - R_2 - R_3 + R_4) a \cos \alpha + M_z = 0 \quad (3.5)$$

$$(-R_1 - R_2 + R_3 + R_4) a \sin \alpha + M_y = 0$$

где M_z и M_y - моменты внешних сил относительно осей ОУ и ОZ, откуда

$$(R_4 + R_2) = \frac{f_3 + f_4}{2} \quad (3.6)$$

$$(R_1 - R_3) = \frac{f_3 - f_4}{2}$$

где $f_3 = -\frac{M_z}{a \cos \alpha}$, $f_4 = \frac{M_y}{a \sin \alpha}$

из (3.3) и (3.6) получим выражения реакций в опорах

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{f_1 + f_2 + f_3 - f_4}{4} \\ R_2 &= \frac{f_1 - f_2 + f_3 + f_4}{4} \\ R_3 &= \frac{f_1 + f_2 - f_3 + f_4}{4} \\ R_4 &= \frac{f_1 - f_2 - f_3 + f_4}{4} \end{aligned} \quad (3.7)$$

В формулы (3.3) и (3.4) входят выражения f_1 , содержащее силу зажима детали, от которой зависят величины реакций и сила трения в точках контакта. Учитывая выражение (3.3), получим при R_i равных нулю условия жесткого фиксирования детали получим из условий

при $R_1 = 0$ $\frac{Q - F_z}{\sin \alpha} + f_2 + f_3 - f_4$, откуда

$$Q \geq \frac{F_z}{\sin \alpha} - f_2 - f_3 + f_4$$

при $R_2 = 0$ $\frac{Q - F_z}{\sin \alpha} - f_2 + f_3 + f_4$, откуда

$$Q \geq \frac{F_z}{\sin \alpha} + f_2 - f_3 - f_4$$

при $R_3 = 0$ $\frac{Q - F_z}{\sin \alpha} + f_2 - f_3 + f_4$, откуда

$$Q \geq \frac{F_z}{\sin \alpha} - f_2 + f_3 - f_4$$

при $R_4 = 0$ $\frac{Q - F_z}{\sin \alpha} - f_2 + f_3 + f_4$, откуда

$$Q \geq \frac{F_z}{\sin \alpha} + f_2 - f_3 - f_4$$

Формулы (3.9) и (3.12) дают условия жесткого удерживания детали по фиксированным координатам при действии внешних сил F_y , F_z , M_x , M_z . Однако, по незафиксированным координатам, повороту вокруг оси цилиндра и перемещению вдоль этой оси, возможные перемещения не устраняются.

4. Фиксирование цилиндрической детали силами трения

Фиксирование не полностью зафиксированных возможных перемещений цилиндрических деталей может быть получена силами трения. Силы трения T_1 , T_2 , T_3 , T_4 возникают в точках контакта при относительном смещении тел.

Примем, что силы трения пропорциональны силам нормальных реакций, т.е.

$$T_i = f R_i \quad (i = 1, 2, 3, 4),$$

где f - коэффициент трения, R_i - реакции в точках контакта.

Проектируя силы трения и внешние силы, действующие по оси ОХ, запишем уравнение равновесия по этой оси.

$$\sum_{i=1}^4 f R_i r = M_x \quad (4.1)$$

$$\sum_{i=1}^4 f R_i = F_x \quad (4.2)$$

здесь F_x , M_x - соответственно проекции сил и момента инерции схвата на ось ОХ, r - радиус цилиндра, R_i - реакции в точках контакта и детали определенные ранее по формулам (3.7)

Условия фиксирования цилиндрической детали с учетом сил трения.

$$f \sum_{i=1}^4 R_i \geq F_x \quad (4.3)$$

$$f \sum_{i=1}^4 R_i r \geq M_x$$

Заменяя реакции в мочках контакта детали с элементами схвата из (4.3) получим условия для величины зажима детали, обеспечивающего фиксирование её возможных перемещений по оси ОХ силами трения.

$$Q_1 \geq 2F_z + \frac{M_x}{2f_2 \sin \alpha} - (f_3 + f_4) \sin \alpha \quad (4.4)$$

$$Q_1 \geq 2F_z + \frac{F_x}{2f \sin \alpha} - (f_3 + f_4) \sin \alpha$$

Силы и моменты сил инерции, действующие на деталь, зависят от кинематической схемы робота и выполняемых им переносных движений.

Для роботов, работающих в цилиндрической системе координат имеем, в проекциях на оси, связанные с выходным звеном робота имеем

$$\begin{aligned} F_x &= m\ddot{\phi}_1 S_3 \\ F_y &= m\dot{\phi}_1^2 S_3 + 2m\dot{\phi}_1 S_3 \dot{S}_3 \\ F_z &= m\ddot{S}_3 \end{aligned} \quad (4.5)$$

Для роботов работающих в сферической системе координат имеем.

$$\begin{aligned} F_x &= m[\ddot{\phi}_1 S_3 \cos \varphi_2 - 2\dot{\phi}_1 \dot{S}_3 \sin \varphi_2 + 2\dot{\phi}_1 \dot{\varphi}_2 \sin \varphi_2 \cos \varphi_2] \\ F_y &= m[\ddot{S}_3 + \dot{\varphi}_2^2 S_3 + \dot{\phi}_1^2 S_3 \cos^2 \varphi_2] \\ F_z &= m[\ddot{\varphi}_2 S_3 - 2\dot{\varphi}_2 \dot{S}_3 + \dot{\phi}_1^2 S_3 \sin \varphi_2 \cos \varphi_2 + \dot{\phi}_1 \dot{S}_3 \cos \varphi_2] \end{aligned} \quad (4.6)$$

здесь $\phi_1, \varphi_2, S_2, S_3$ - обобщенные координаты робота.

Заключение

При использовании промышленного робота на выполнении транспортных операций, при расчёте удерживающей способности схвата, необходимо учитывать силы трения детали с элементами схвата и силы инерции детали при её движении.

Приведены выражения для определения сил инерции детали, переносимой роботом, работающим в цилиндрической и сферической системе координат при выполнении переносных движений.

Получены расчётные соотношения, позволяющие определить необходимые усилия зажима плоских и цилиндрических деталей в схвате робота, обеспечивающие удерживание деталей силами трения и повысить безопасность применения роботов в технологических процессах[4].

1. Челпанов И.Б., Калашников С.Н. Схваты промышленных роботов. Л. 1989 Машиностроение. 288 с.
2. Корсаков В.С. Основы конструирования приспособлений в машиностроении. М.: Машиностроение. 1984. 285 с.
3. Механика промышленных роботов. В 3 кн. Под ред. К.В. Фролова, Е.И. Воробьёва .Кн.2:Расчёт и проектирование механизмов/-М:Высшая школа. 1988. 367 с.
4. Прочность, ресурс, живучесть и безопасность машин/ Махутов Н.А. Албагачиев А.Ю. и др. – М.: Книжный дом "Либроком". 2019 519 с.

СИСТЕМА ТАКТИЛЬНОГО И СИЛОВОГО ОЧУВСТВЛЕНИЯ ПРОТЕЗА КИСТИ РУКИ

Е.И. Воробьев, А.В. Михеев, В.О. Дорофеев, Е.Е. Конева

Институт машиноведения им А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

В работе предложен метод и система управления для тактильного и силового очувствления протезов рук. Для решения задачи получения информации о касании кисти прореза руки, захватываемого объекта и возникающих при этом усилиях, используются силовые датчики на кончиках пальцев протеза кисти. Сигнал передается дистанционно на вибратор, расположенный в браслете, устанавливаемом на предплечье руки. Изготовлен экспериментальный макет протеза кисти руки, с разработанной системой очувствления.

Проблема создания протезов рук, приближающихся по своим функциональным возможностям к рукам человека, еще далека от своего решения. Основными проблемами при создании полного протеза руки являются проблемы управления и очувствления. Наибольшие успехи достигнуты в настоящее время при создании протезов кисти руки. В этом случае для управления используются сигналы оставшихся мышц руки [1]. Однако при полной потере руки такая возможность отсутствует. В этом случае для создания многофункционального протеза руки предложено использовать метод полуавтоматического управления [2].

В направлении создания очувствленных протезов рук можно отметить два основных направления. Одно из этих направлений состоит в установке в мозг человека специальных датчиков и разработке специального интерфейса, второе – предполагает установку датчиков в плечо и разработку системы связи протеза с этим датчиком. Однако оба эти метода предполагают хирургическое вмешательство, а работы находятся в поисковом состоянии.

Ниже предлагается метод очувствления протеза руки на основе преобразования силового или контактного воздействия протеза с предметом в вибрационное воздействие на кожу человека [3].

В данном случае для тактильного и силового очувствления протеза используется преобразование внешнего воздействия в вибрацию, передаваемую оператору. Для этого применяется датчик давления, располагаемый в месте касания, например, на кончике пальца протеза. Наиболее удобными и простыми в использовании являются контактные резистивные датчики. Данный датчик соединяется с вибратором, который можно расположить на коже человека. При нажатии на датчик давления, на вибратор поступает электрическое напряжение

заданной частоты и вибратор колеблется, давая знать человеку, что произошло касание предмета.

Преобразование давления в амплитуду вибраций позволяет определять силу в точке касания и дает знать человеку, насколько сильно протез сдавливает предмет. Информацию от датчиков давления можно использовать для защиты приводов от перегрузки. Для того, чтобы можно было различать от какого именно датчика поступает сигнал, частота вибраций задается различной для каждого канала

Система очувствления протеза руки частично восстанавливает осязательные ощущения, позволяет пользователю контролировать усилие захвата и передает тактильную информацию об удерживаемом предмете, что позволяет подстраивать положение пальцев под его форму. По усилию захвата можно косвенно судить о весе предмета.

Для изучения возможностей описанного метода очувствления был изготовлен опытный образец тактильного браслета с 5 вибраторами, приводимых в действие от 5 датчиков давления, по количеству пальцев на руке человека (рис. 1). Образец показал возможность определения момента касания предмета и возможность идентификации касания различными пальцами.

Тактильный браслет может устанавливаться на предплечье руки с учетом расположения контактов с рукой напротив пальцев протеза кисти. В этом случае момент действия тактильного сигнала на коже руки будет соответствовать моменту касания пальцем протеза объекта.

Для уверенного пользования браслетом для управления протезом руки потребуются определенный период обучения. Экспериментальный вид тактильного браслета показан на рис. 1.

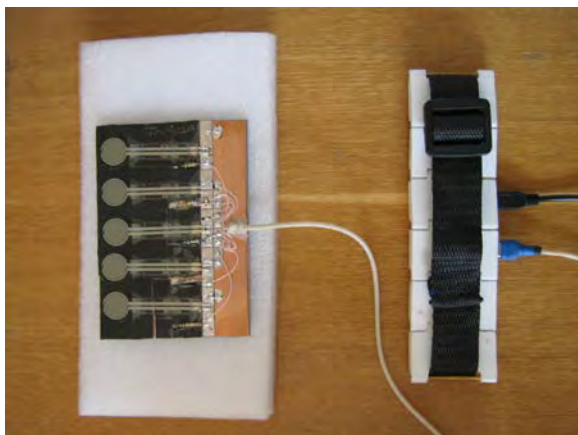


Рис. 1. Образец тактильного браслета руки.

Система очувствления использует датчики нормальной силы, расположенные в подушечках пальцев протеза. Датчики представляют собой резисторы чувствительные к давлению, включенные в делитель напряжения.

При действии внешней силы на палец протеза изменяется сопротивление датчика и напряжение на делителе. Полученный сигнал усиливается и поступает на вход аналого-цифрового преобразователя (рис. 2).

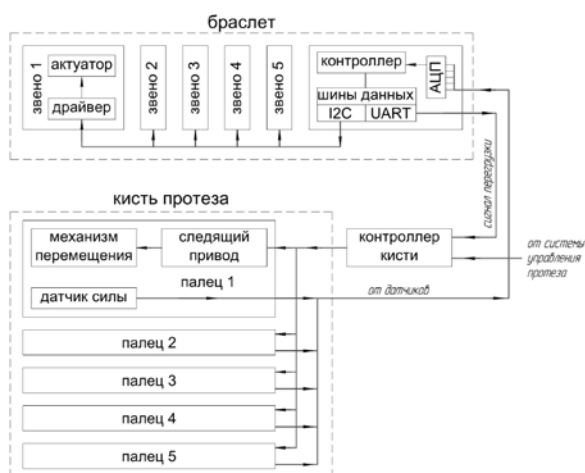


Рис. 2. Структурная схема действия тактильного браслета.

Датчик состоит из изолирующего основания с металлизацией в виде двух групп соединенных между собой контактов ячеистой прокладки из изоляционного материала и мембраны с токопроводящим покрытием. Когда к мембране прикладывается внешняя сила мембрана прогибаясь замыкает группы контактов. На нагрузочном регистре возникает ток, зависящий от внешней силы служащий выходным сигналом.

Тактильная обратная связь достигается при помощи пяти вибрационных актуаторов (груз на управляемом электромагнитном подвесе или попросту вибратор), встроенных в специальный браслет. В каждом звене браслета расположен один актуатор и плата управления. В одном из звеньев размещен контроллер со встроенным аналого-цифровым преобразователем и усилитель сигналов с датчиков. Контроллер отсекает постоянную составляющую сигнала, которая идет при отсутствии нагрузки, и преобразует показания датчиков в амплитуду вибрации в соответствии с логарифмическим масштабом, а также формирует сигнал перегрузки для приводов протеза. Звенья с актуаторами и контроллер связаны цифровой шиной передачи данных по которой исполнительным звеньям передается информация о амплитуде и частоте вибрации. Для лучшей различимости вибрации от разных актуаторов, каждому датчику усилия соответствует своя частота вибрации. Браслет связан с протезом кабелем, по которому идут сигналы от датчиков, сигнал перегрузки и напряжение питания. Алгоритм работы показан на рис. 3.

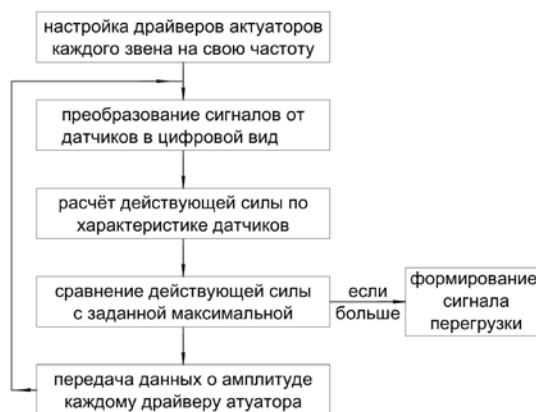


Рис. 3. Алгоритм функционирования браслета.

1. Кобринский А.Е. Использование биотоков для целей управления // Изв. АН СССР. ОТН. Энергетика и автоматика. 1959. № 3 с. 38-48.
2. Воробьев Е.И. Михеев А.В. Моргуненко К.О. Метод управления протезом руки от движений пальцев ноги // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2017. № 1. с. 73-76.
3. Воробьев Е.И., Михеев А.В., Константинов А.Н. Метод полуавтоматического управления протезом руки // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2018. № 3. с. 96-101.
4. Чижиков В.И. Курнасов Е.В. Воробьев Е.И. Алгоритм захвата предмета на основе тактильного распознавания его поверхности // Вестник машиностроения. 2018. № 1. с. 16-20.

МЕХАНИЗМЫ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ ТОПОКОМПОЗИТА СИСТЕМЫ AlN-D16T ПРИ МИКРОИНДЕНТИРОВАНИИ

Н.А. Воронин

Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва, Россия; voroninn@inbox.ru

Проведен качественный анализ экспериментальных диаграмм внедрения топокомпозиата с покрытием из нитрида алюминия на подложке из алюминиевого сплава Д16Т. Установлено, что высокий уровень гистерезисных потерь и нелинейный вид конца кривых разгрузки диаграммы внедрения топокомпозиата связаны с твердофазными структурными изменениями материала покрытия.

Сегодня в машиностроении и других отраслях промышленности широкое применение получили вакуумные ионно-плазменные покрытия на основе тугоплавких химических соединений для решения задач трибологии в виде топокомпозиатов. Точное соблюдение технологических режимов получения покрытий и их качество часто оценивается инструментальным индентированием на нано- и микроуровне. Умение грамотно интерпретировать диаграммы внедрения топокомпозиатов актуально для оптимизации структуры покрытий и строения топокомпозиатов.

Целью работы является установление механизмов деформационного поведения топокомпозиата системы нитрид алюминия – алюминиевый сплав Д16Т по результатам анализа диаграмм внедрения топокомпозиата и известных в литературе результатов материаловедческих исследований поведения керамических материалов при высоких удельных нагрузках, в том числе и при индентировании.

Материалы и методики исследований.

В работе для получения диаграмм внедрения используется модельный образец топокомпозиата с покрытием из нитрида алюминия. Образец в виде параллелепипеда был изготовлен из алюминиевого сплава марки Д16Т (термическая обработка: закалка и естественное старение). На плоскую исследуемую поверхность образца было нанесено покрытие нитрида алюминия (AlN) толщиной ~5 мкм. Технология получения покрытий – магнетронное напыление на установке МИР-2 путем распыления чистого алюминия (99,999%) в среде смеси газов – аргона и азота. Покрытие из нитрида алюминия имело кристаллическую решетку типа вюрцита гексагональной сингонии и соответствовала стехиометрическому составу. Покрытие имело мелкодисперсную структуру столбчатого вида и состояло из кристаллитов размером 100-150 нм. Электронографические исследования показали наличие текстуры в покрытии с ориентацией кристаллитов плоскостью (0001) параллельно поверхности подложки. Расчет нанотвердости и модуля упругости компонентов топокомпозиата проводился по результатам анализа диаграмм внедрения, полученных на нанотвердомере НаноСкан4D. Индентором служила трехгранная алмазная пирамида Берковича. Вид индентов изучался с помощью 3D оптического микро-

скопа Sneox (SENSOFAR). Нанотвердость покрытия составляла 36 ГПа, модуль упругости 320 ГПа; микротвердость материала подложки 0,98 ГПа, модуль упругости 93 ГПа. Твердость и модуль упругости компонентов топокомпозиата рассчитывались по методике Оливера и Фара [1].

Результаты исследования и обсуждение.

Экспериментальные диаграммы внедрения для топокомпозиата системы AlN-Д16Т для ряда конечных нагрузок внедрения представлены на рис. 1. Кривая разгрузки проявляет сильную нелинейность конца кривой разгрузки с ростом величины конечной нагрузки внедрения. Отмечаемая нелинейность начинается с нагрузок в районе 0,15 Н и возрастает с ростом величины конечной нагрузки внедрения. Визуальный осмотр индентов не обнаружил следов повреждений на поверхности покрытия для первых трех диаграмм внедрения. При предельных нагрузках 0,5 Н установлено возникновение на поверхности покрытия круговых поперечных трещин на расстоянии примерно в 1,5 раза большем, чем диаметр отпечатка.

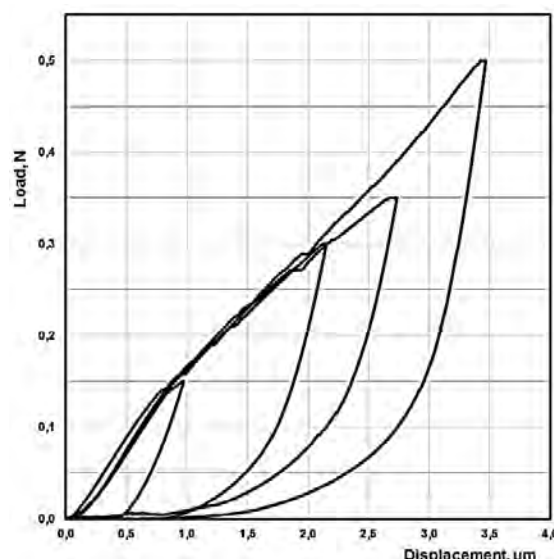


Рис. 1. Диаграммы внедрения для топокомпозиата с нитрида алюминия при различных значениях конечной нагрузки на индентор

Сильная кривизна кривой разгрузки в нижней части кривой разгрузки для топокомпозиата с покрытием из нитрида алюминия объясняется присутствием поврежденности покрытия в виде от-

слаивания [2]. Возникновение отслаивания объясняется слабой адгезией покрытия к подложке. В научной литературе достаточно широко описаны случаи повреждаемости покрытий при индентировании в виде отслаивания при отсутствии нарушения сплошности покрытия [3,4]. Однако отслаивание проявляется на кривой разгрузки диаграммы внедрения в виде участка с линейной зависимостью. При этом радиус отслаивания ограничен областью контактной областью индентора.

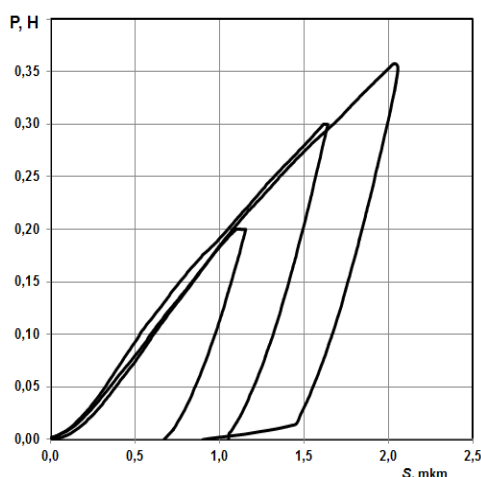


Рис. 2. Диаграммы внедрения для топокомпозита с нитрида титана при различных значениях конечной нагрузки на индентор

Отсутствие в литературе исследований твердых тонких покрытий различного состава на подложке из алюминиевого сплава подвигнуло авторов провести исследования топокомпозита системы TiN-D16T. На рис. 2 приведены экспериментальные диаграммы внедрения топокомпозита системы TiN-D16T при разных конечных нагрузках. При нагрузке ~ 350 мН была получена диаграмма с характерным линейным участком конца привой разгрузки.

Анализируя результаты индентирования в два топокомпозита при примерно одинаковых глубинах внедрения с одинаковыми материалами основы можно предполагать, что различие в виде кривых разгрузок объясняется структурными или фазовыми изменениями в материале покрытия из нитрида алюминия.

Были проведены дополнительные эксперименты с двумя топокомпозитами, заключающиеся в повторных нагружениях и анализе повторных кривых нагружения и разгрузки. (рис. 3 и рис. 4). Диаграмма на рис. 3 демонстрирует хорошо известный в литературе вид диаграммы внедрения слоистой системы с отслаиванием - с линейным видом кривой разгрузки в конце разгрузки при повторном индентировании. Для количественной оценки параметров отслаивания в таких слоистых системах используют модель упругой круглой мембраны, защемленной по краю и нагруженной в центре на оси симметрии силой. Для такого нагружения характерна линейная зависимость между нагрузкой и

прогибом. Подобная линейная зависимость наблюдается у исследуемого в данной работе топокомпозита с покрытием из нитрида титана также и в третьем цикле деформирования.

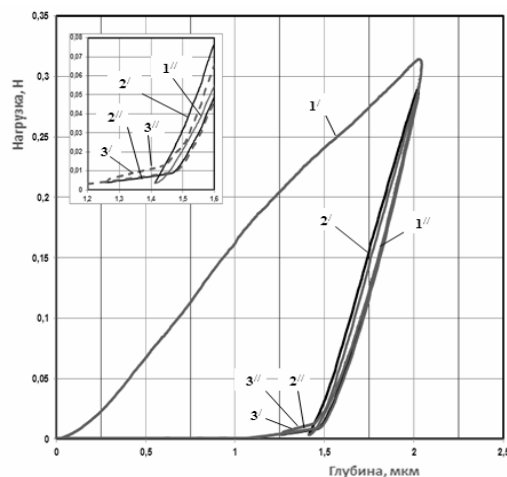


Рис. 3. Повторные диаграммы внедрения для топокомпозита с покрытием нитрида титана: 1', 2', 3' - кривые нагружения, 1'', 2'', 3'' - кривые разгрузки для первого, второго и третьего цикла деформирования

Кривые нагружения второго и третьего цикла деформирования, реализуя упругое деформирование слоистой системы, располагаются на незначительном расстоянии от кривой разгрузки первого цикла индентирования. В работе [5] отмечается, что заметный гистерезис во время испытаний на многоцикловое индентирование может происходить из-за разрушения, фазового превращения и вязкоупругой или вязкопластической деформации. Любой из указанных процессов проявляет тенденцию к увеличению площади петли гистерезиса. В случае, представленном на рис. 3, мы можем говорить хорошей повторяемости циклов деформирования и малой по величине и неизменной при повторении ширине гистерезисных петель. Такое поведение топокомпозита с покрытием из нитрида титана говорит о хорошей сохранности структуры и состава компонентов топокомпозита. Можно говорить лишь о незначительной пластической деформации при повторных нагружениях и, в первую очередь, материала покрытия, при смене направления деформирования.

Для топокомпозита с покрытием из нитрида алюминия (см. рис. 4) диаграмма внедрения с повторными циклами деформирования, отличается от диаграммы внедрения для топокомпозита с покрытием из нитрида титана, как на первом цикле, так и на последующих. Второй цикл деформирования показывает кривую нагружения далеко отстоящую от кривой разгрузки первого цикла деформирования.

Характерной чертой этих гистерезисных петель является значительная ширина петель, по сравнению с гистерезисными петлями топокомпозита с покрытием из нитрида титана. Вид гистерезисных пе-

тель, их изменение при последующих повторных циклах деформирования и ширина петель у топокомпози́та с покрытием из нитрида алюминия говорит о значительных структурных перестройках в материале топокомпози́та при каждом цикле индентирования. Ширина гистерезисных петель говорит о величине затрат энергии на структурную перестройку материала топокомпози́та.

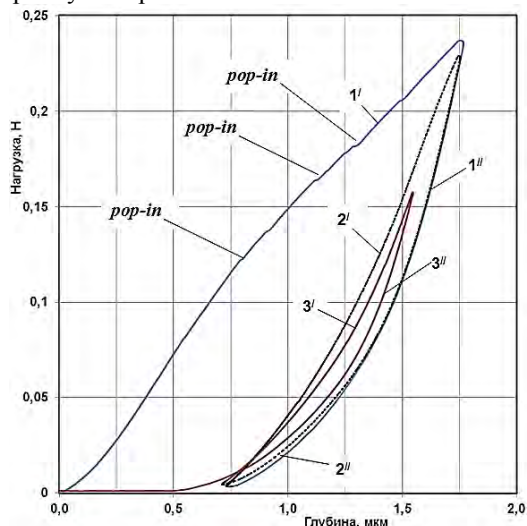


Рис. 4. Повторные диаграммы внедрения для топокомпози́та с покрытием нитрида алюминия: 1', 2', 3' – кривые нагружения и 1'', 2'', 3'' – кривые разгрузки для первого, второго и третьего цикла деформирования

Дополнительным подтверждением структурных изменений в покрытии из нитрида алюминия является наличие «неровностей» отдельных участков кривой нагружения. Кратковременные периодические резкие изменения глубины внедрения при постоянной нагрузке, в литературе получившие название «pop-ins», отвечают различным механизмам – образованию трещин на поверхности, дислокационному перемещению, проскальзыванию по границе зерен.

Анализ литературы [5 - 7] о структурообразовании в ковалентных кристаллах (алмаз и алмазоподобные фазы BN, SiC, AlN) на стадии пластической деформации позволяет утверждать, что покрытие из нитрида алюминия в исследованном в данной работе топокомпози́те подвергнулось структурным изменениям в период индентирования. В работе [6] помощью молекулярно-динамического моделирования исследованы фазовые превращения при наноиндентировании в поверхность (0001) монокристаллического AlN со структурой вюрцита. При увеличении глубины вдавливания следующие эффекты наблюдаются последовательно: разрыв поверхности; зарождение и рост графитоподобной фазы; образование и течение аморфной фазы; генерация тетрагональной промежуточной структуры.

Значительные энергетические расходы на твердофазные структурные превращения в покрытии из нитрида алюминия, затраченные на этапе внедрения индентора в топокомпози́т, создают существенный запас упругой энергии в покрытии (в виде напря-

жений сжатия), который реализуется в процессе разгрузки. Эти напряжения в сочетании с напряжениями растяжения от изгиба покрытия при внедрении индентора в топокомпози́т приводит к появлению кривой разгрузки с сильно нелинейным участком в нижней части кривой разгрузки диаграммы внедрения. Площадь фигуры под нелинейной частью кривой разгрузки, характеризующая энергию, реализуемую на диссипацию энергии от напряжений в покрытии, включают в себя и энергию, затрачиваемую на упругое восстановление, отслаивающегося покрытия. Механизм, реализующий отслаивание покрытия, аналогичен механизму восстановления круглой упругой диафрагмы с закрепленным по периферии краем и изогнутой под действием центрально расположенной нагрузки.

Заключение.

Проведен качественный анализ экспериментальных диаграмм внедрения топокомпози́та с покрытием из нитрида алюминия на подложке из алюминиевого сплава Д16Т. Установлено, что высокий уровень гистерезисных потерь и нелинейный вид конца кривых разгрузки диаграммы внедрения топокомпози́та связан с твердофазными структурными изменениями материала покрытия. Уровень гистерезисных потерь материала покрытия является существенным параметром, влияющим на характер деформирования и вид кривой разгрузки диаграммы внедрения и должен учитываться при анализе работоспособности слоистых систем.

Благодарю научного сотрудника Кравчука К.С. за получение экспериментальных диаграмм внедрения и изображения индентов.

1. Oliver W.C., Pharr G.M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments // J. Mater. Res. 1992. V. 7. N. 6. P. 1564-1583.
2. Abdul-Baqi A., Van der Giessen E. Delamination of a strong film from a ductile substrate during indentation unloading // Journal of Materials Research. 2001. V.16. No.5. P. 1396 – 1407.
3. Chen J. Indentation-based methods to assess fracture toughness for thin coatings. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2012. V.45. 203001. P.1-14.
4. Bhushan B. Depth - sensing nanoindentation measurement techniques and applications. // Microsyst. Technol. 2017. V. 23. P. 1595-1649.
5. Luo X., Zhang Z. etc. Atomistic simulation of amorphization during AlN nanoindentation. // Ceramics International. 2021. V.47. P.15968-15978.
6. Олейник Г. С. Структурные механизмы пластической деформации керамических материалов. // Электронная микроскопия и прочность материалов. 2014. № 20. С.3-30.
7. Штанский Д.В., Кулинич С.Л., Левашов Е.Л., Моогё J.J. Особенности структуры и физико-механических свойств наноструктурных тонких пленок // Физика твердого тела. 2003. Т. 45. №. 6. С.1122 – 1129.

ИННОВАЦИОННОЕ ИЗГОТОВЛЕНИЕ ВЫДАВЛИВАНИЕМ П-ОБРАЗНЫХ КРОНШТЕЙНОВ С ПРОИЗВОЛЬНЫМ СООТНОШЕНИЕМ ТОЛЩИН СТЕНОК

А.Л. Воронцов, С.М. Карпов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия; mt13@bmstu.ru

Обоснована актуальность проведения исследования с целью определения основных технологических параметров инновационного способа выдавливания П-образных кронштейнов с разной толщиной стенок. Выполнены механико-математические исследования процесса как для горячей штамповки без упрочнения, так и для холодной штамповки с учётом упрочнения выдавливаемого материала. Приведены экспериментальные результаты, подтверждающие высокую точность выполненного исследования.

Анализ современной справочной и специализированной технической литературы показывает, что разнотолщинные детали типа П-образных кронштейнов используются в машиностроении, автомобилестроении и авиастроении. При этом в современных технологиях изготовления таких деталей важнейшими задачами являются повышение их прочностных характеристик, максимальное снижение энергетических затрат и расхода металла, а также повышение производительности и стойкости инструмента. Такие задачи могут быть решены путём применения малоотходного обратного выдавливания, показанного на рис. 1.

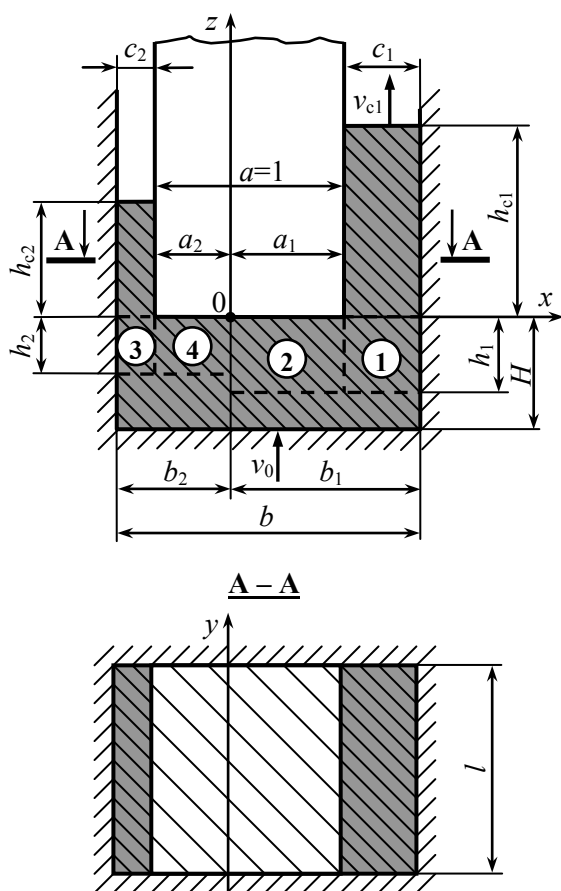


Рис. 1. Расчётная схема выдавливания кронштейна

Ранее такое выдавливание изучалось В.А. Евстратовым и Е.И. Семёновым, однако полученные ими результаты являются неполными, а в ряде мест спорными и противоречивыми, и не позволяют выполнять успешное технологическое проектирование подобных процессов. Поэтому детальное исследование такой операции малоотходной штамповки является актуальным.

Эксперименты показывают, что при неодинаковой ширине каналов истечения c_1 и c_2 (общий случай такого выдавливания) происходит более интенсивное течение выдавливаемого металла в канал большей ширины c_1 , в результате чего один вертикальный элемент кронштейна получается выше другого. При этом соотношение высот h_{c1} и h_{c2} имеет вариационный характер и не может быть достоверно вычислено каким-либо простым способом. Поэтому одной из главных целей теоретического исследования являлось определение степени влияния различных параметров выдавливания на интенсивность течения в каналы неодинаковой ширины.

В выполненном нами механико-математическом исследовании была использована полная система классических уравнений теории пластического течения, которая решалась с помощью общего метода А.Л. Воронцова.

С целью обобщения в решении использовались относительные величины геометрических параметров, отнесённые к принятому за единицу поперечному размеру a рабочего торца пуансона.

Материал заготовки считался жёсткопластическим, а упрочнение учитывалось средней величиной напряжения текучести σ_s (т.е. математически задача ставилась как задача идеальной пластичности). Поскольку средние значения накопленных деформаций в системе областей 1, 2 и 3, 4 могут отличаться друг от друга, то, соответственно, среднюю величину напряжения текучести в системе областей 1, 2 обозначали σ_{s1} , а среднюю величину напряжения текучести в системе областей 3, 4 обозначали σ_{s2} . Учёт влияния упрочнения на рассматриваемый процесс и определение величин напряжений текучести σ_{s1} и σ_{s2} были далее выполнены с помощью разработанного А.Л. Воронцовым общего метода определения накопленных деформаций.

Силы контактного трения описывались по закону Зибеля как $\tau_k = \mu \beta \sigma_s$, где μ – коэффициент трения по напряжению текучести, а β – коэффициент Лоде (при рассматриваемой плоской деформации $\beta=1,155$). Подбирая соотношение между коэффициентами трения μ_1 и μ_2 на поверхностях соприкосновения заготовки и матрицы путём, например, обезжиривания одной поверхности и смазывания другой, или нанесения на соответствующие стенки матрицы или боковые поверхности заготовки смазок разной эффективности, можно добиться изменения соотношения интенсивности течения металла в каналы разной толщины и таким образом получить требуемое соотношение высот получаемых вертикальных элементов кронштейна.

Выведенные формулы и полученные с их помощью методики расчёта основных технологических параметров позволили спланировать, а затем осуществить большую серию проверочных экспериментов, полностью подтвердивших высокую практическую точность выполненных теоретических исследований.

Эксперименты проводились с помощью штампа, показанного на рис. 2.

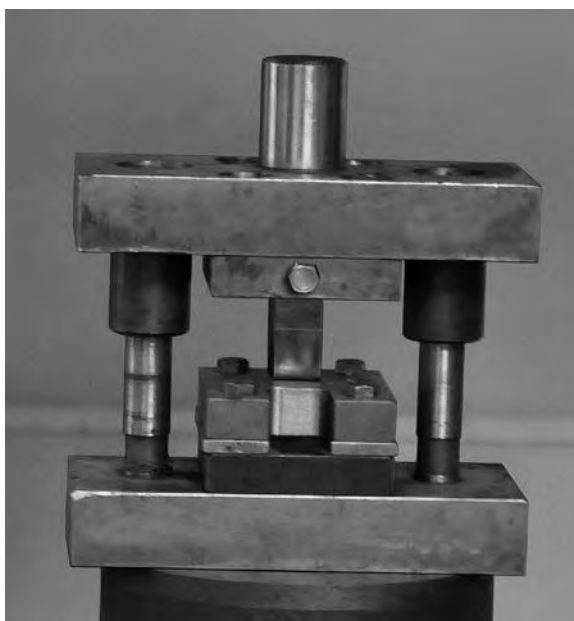


Рис. 2. Экспериментальный штамп для выдавливания П-образных образцов

Часть результатов данных экспериментов приводится нами далее.

Применительно к горячей штамповке моделирование осуществлялось с помощью заготовок, выполненных из свинца С00. А для проверки холодной штамповки упрочняющихся материалов использовался авиационный алюминиевый сплав АВ.

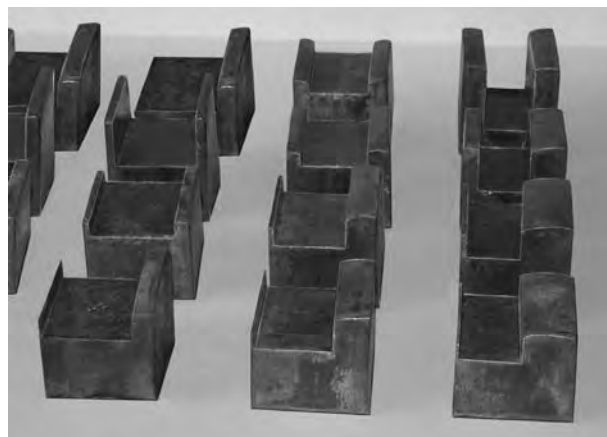


Рис. 3. Представительная серия выдавленных образцов из свинца С00

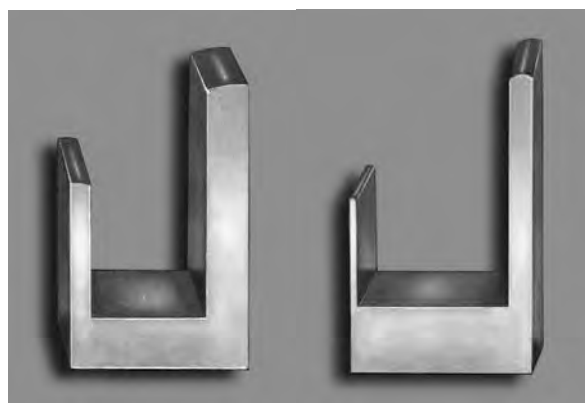


Рис. 4. Образцы из алюминиевого сплава АВ

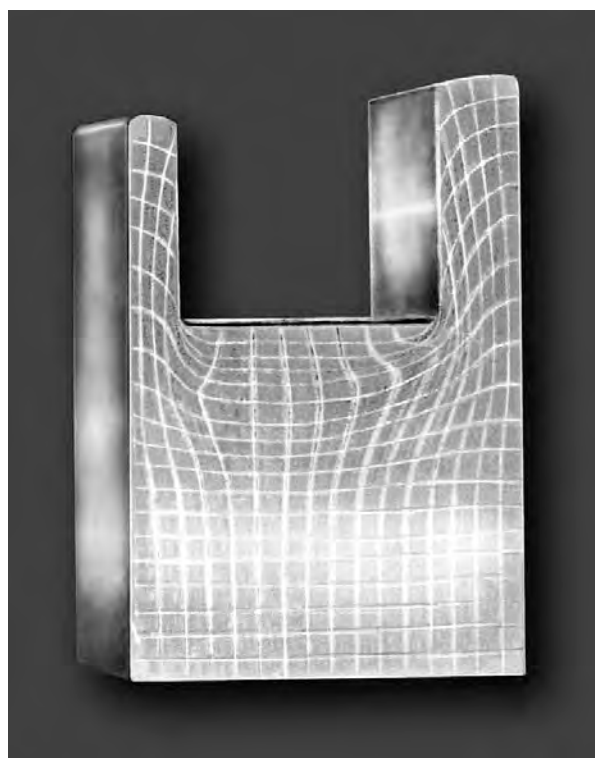


Рис. 5. Образец из алюминиевого сплава АВ с сеткой

ФУНДАМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЩЕГО СЛУЧАЯ КОМБИНИРОВАННОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ СТАКАНОВ С КОНИЧЕСКИМ ДНОМ

А.Л. Воронцов, Д.А. Лебедева

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия; mt13@bmstu.ru

Обоснована актуальность проведения исследования с целью определения основных технологических параметров нового способа комбинированного выдавливания деталей типа стаканов с коническим дном. Приведены полученные результаты, доказавшие большую эффективность данного способа штамповки.

Анализ современной справочной и специализированной технической литературы показывает, что полые детали типа стаканов с конической донной частью в многомиллионных количествах используются в машиностроении, автомобилестроении, авиастроении и оборонной промышленности. При этом в современных технологиях изготовления таких деталей важнейшими задачами являются не только повышение их прочностных характеристик, но и максимальное снижение энергетических затрат и расхода металла, а также повышение производительности и стойкости инструмента. Такие задачи могут быть решены путём применения комбинированного выдавливания, совмещающего формовку конического дна с выдавливанием полости стакана (рис. 1). Ранее такое выдавливание никем не изучалось, поэтому детальное исследование новой операции малоотходной штамповки является актуальным.

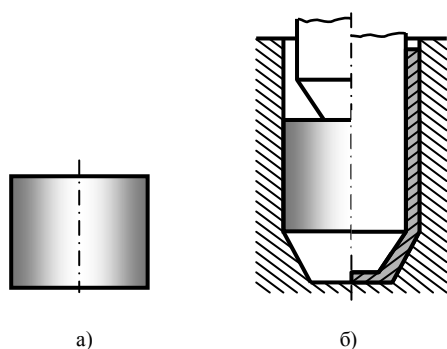


Рис. 1. Предлагаемая технология выдавливания стаканов с конической донной частью: а – исходная заготовка; б – выдавливание

Традиционно изделия типа стаканов с конической донной частью получают за два перехода, на первом из которых выполняют калибровку с получением наружного конуса донной части, а на втором переходе выдавливают полость стакана. При этом обратное выдавливание полости обычно требует создания очень больших удельных сил, которые, например, даже при выдавливании низкоуглеродистых сталей, типа стали 20, достигают величин 2200–2500 МПа. При комбинированном выдавливании металл имеет возможность одновременного течения не только в образующуюся стенку, но и в коническую донную часть изделия.

Таким образом, тут, помимо уменьшения числа переходов, будут одновременно выполняться операции прямого и обратного выдавливания, что, согласно теоретическим и экспериментальным данным работ А.Л. Воронцова, приведёт к значительному снижению как общей силы выдавливания, так и удельных деформирующих сил и напряжений в очаге пластической деформации. Это, соответственно, либо позволит за один переход получать более тонкостенный стакан, чем в традиционном способе штамповки, либо значительно повысит стойкость инструмента, поскольку заводская статистика показывает, что снижение удельной силы выдавливания всего на 10% приводит к увеличению стойкости пуансона на 35–50%. Поэтому при выдавливании даже небольшое снижение силы является важным. А с учётом того, что при традиционном способе изготовления не только на операции выдавливания, но также и на предварительной операции калибровки затрачивается значительная энергия, суммарная экономия электроэнергии при новом способе является весьма значительной.

Несмотря на кажущуюся простоту нового процесса пластической деформации, на самом деле его механико-математическое описание представляет собой исключительно сложную вариационную задачу, поскольку в зависимости от высоты исходной заготовки, соотношения наибольших рабочих радиусов пуансона и матрицы, формы донной части матрицы и формы рабочего торца пуансона, а также коэффициентов трения реальное пластическое течение может происходить очень разнообразно (рис. 2). При этом итоговый вид получаемых изделий может отличаться мало, либо не отличаться совсем.

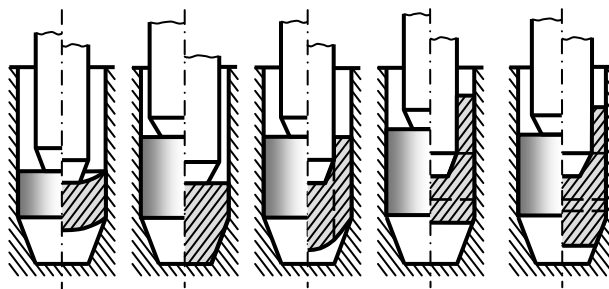


Рис. 2. Возможные варианты протекания процесса

В результате выполненного механико-математического анализа с помощью общего метода решения сложных вариационных задач, разработанного А.Л. Воронцовым, для всех возможных вариантов протекания нового способа штамповки были получены все формулы, необходимые для их успешного проектирования и внедрения в производство, а также для выбора оптимальных параметров деформирования ещё на стадии предварительной технологической проработки.

Следует отметить, что даже для традиционного выдавливания никаких расчётных формул, учитывающих одновременное наличие конических участков как на пуансоне, так и на матрице, ранее не существовало.

Для проверки полученных теоретических результатов авторами были выполнены многочисленные эксперименты, некоторые результаты которых представлены ниже.

Сначала для подтверждения возможности снижения силы предлагаемым способом были проведены сравнительные эксперименты на заготовках из свинца С00.

Одни заготовки, в соответствии с традиционной технологией, сначала формовались до полного оформления наружного конуса в донном вкладыше и лишь затем выдавливались.

В соответствии с предлагаемой новой технологией, другие заготовки с теми же геометрическими параметрами без предварительной формовки сразу же выдавливались.

Сопоставительные диаграммы изменения силы по ходу выдавливания показаны на рис. 3. Из них видно, что на большей части рабочего хода предлагаемое комбинированное выдавливание требует на 30% меньшей силы деформирования, чем традиционное выдавливание.

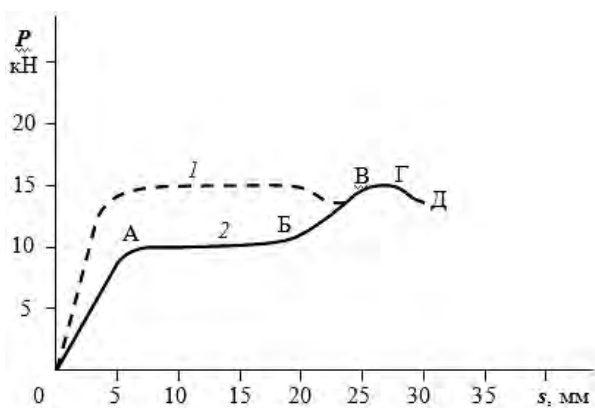


Рис. 3. Сопоставительные диаграммы изменения силы P по ходу выдавливания s : 1 – кривая изменения силы традиционного выдавливания; 2 – кривая изменения силы предлагаемого выдавливания

Дополнительные многочисленные эксперименты, проведенные с различной смазкой на заготовках разных типоразмеров, выполненных из алюминиевого сплава АД1 (рис. 4), латуни Л63

(рис. 5) и стали 12Х18Н9Т (рис. 6), для всех возможных вариантов пластического течения также показали успешные результаты с получением шероховатости отштампованных поверхностей, соответствующей тонкому шлифованию или полированию. Прочностные свойства и твердость материала выдавленных изделий в зоне пластической деформации были повышены в 2–3 раза. При этом расхождение результатов расчета силы выдавливания по полученным формулам с опытными данными не превышало 10%, что позволяет рекомендовать их для практического применения.



Рис. 4. Срезы выдавленных образцов из алюминия АД1



Рис. 5. Срезы выдавленных образцов из латуни Л63



Рис. 6. Срез выдавленного образца из стали 12Х18Н9Т

Таким образом, проведенное исследование убедительно доказывает большую эффективность предлагаемого нового способа выдавливания.

ПРОГРЕССИВНЫЙ СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ ВНУТРЕННЕГО ВЫСТУПА РАДИАЛЬНЫМ ВЫДАВЛИВАНИЕМ ТРУБНОЙ ЗАГОТОВКИ

А.Л. Воронцов, Е.О. Решиков

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия; mt13@bmstu.ru

Обоснована прогрессивность получения внутреннего выступа в полых изделиях путём радиального выдавливания трубной заготовки. Приведены возможные схемы деформирования и достигнутые результаты выполненного исследования.

Анализ современной справочной и специализированной технической литературы показывает, что трубные изделия с цилиндрическим или коническим выступом в полости широко используются в машиностроении, станкостроении, автомобилестроении, авиастроении и оборонной промышленности. Они применяются, например, для производства корпусов выключателей подачи топлива дизеля, корпусов механических клапанов для автоматических установок распыления смазочно-охлаждающих жидкостей, дроссельных крышек распределительных клапанов гидросистем высокого давления, гидравлических фильтров маслопроводов с дросселем и обратным клапаном, пневмодросселей и современных гидродросселей, производством которых занимаются не только наши, но и, например, германские фирмы.

Изучение современного производства показывает, что подобные изделия в настоящее время в подавляющем большинстве случаев получают резанием из сплошных заготовок (трубные заготовки по необходимым соотношениям наружного и внутреннего диаметров подходят для подобных изделий очень редко). Это, соответственно, предопределяет в производстве таких изделий присутствие резанию недостатки: очень низкий коэффициент использования металла, низкую производительность, низкую стойкость инструмента, малое упрочнение, перерезание волокон металла, совершенно недопустимое, например, в топливных системах ракетной техники, поскольку широко используемый в ракетах гелий обладает высокой проницаемостью вдоль волокон макроструктуры, в результате чего раньше неоднократно случались аварии и даже катастрофы при запуске ракет и космических аппаратов.

При этом важнейшими задачами, которые ставятся перед современными технологиями изготовления таких деталей, являются не только повышение их прочностных характеристик, но и максимальное снижение расхода металла, а также повышение производительности и стойкости инструмента. Такие задачи могут быть решены путём применения внутреннего радиального выдавливания (рис. 1), которое ранее никем не изучалось, в связи с чем его детальное исследование является актуальным.

Тут важно указать, что геометрические возможности радиального выдавливания внутрен-

него выступа не ограничиваются наиболее простой схемой, показанной на рис. 1. Таким выдавливанием, варьируя форму и диаметры матрицы и оправки, без особых затруднений можно производить и более сложные изделия.

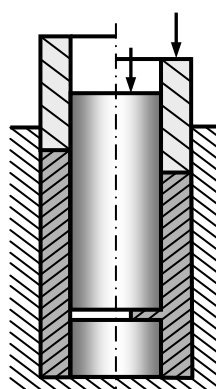


Рис. 1. Радиальное выдавливание трубных изделий с внутренним выступом

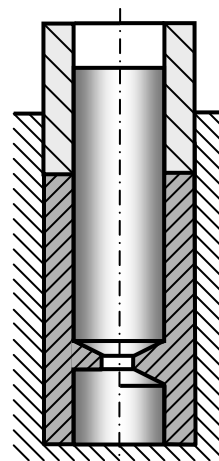


Рис. 2. Радиальное выдавливание изделия с внутренним выступом, снабжённым коническими поверхностями

Например, получаемый выступ может иметь конический или иной скос, причём, как с одной стороны (рис. 2, слева), так и с двух сторон (рис. 2, справа), при этом скосы с верхней и нижней стороны могут иметь неодинаковые углы.

Уменьшив диаметр верхней (рис. 3) или нижней оправки, в результате закрытой посадки на начальном этапе рабочего хода можно получить

соответствующее сужение полости и увеличение толщины стенки.

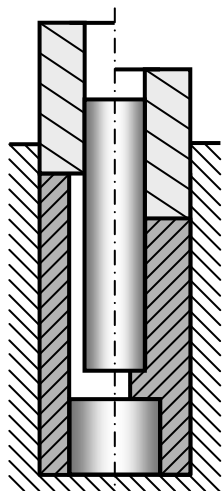


Рис. 3. Радиальное выдавливание изделия с внутренним выступом и верхним участком внутренней поверхности меньшего диаметра, чем нижний

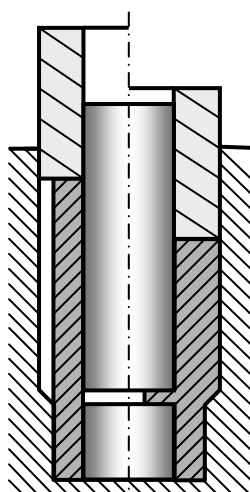


Рис. 4. Радиальное выдавливание изделия с внутренним выступом и ступенчатой боковой наружной поверхностью

Увеличив в нужном месте диаметр полости матрицы и сделав нужную форму переходного участка (рис. 4), можно в результате закрытой высадки на начальном этапе рабочего хода получить соответствующее наружное утолщение стенки изделия.

Очевидно, что можно сочетать схему на рис. 3 со схемой на рис. 4, а также задать при этом любую необходимую геометрию получаемого фланца по схемам на рис. 2.

Таким образом, новый способ позволяет получать большое разнообразие полых изделий с внутренним выступом, приближая коэффициент использования материала к 100%.

Кроме того, при холодном выдавливании

достигается значительное упрочнение получаемого выступа, что существенно повышает его эксплуатационную стойкость.

В результате выполненного механико-математического анализа с помощью общего метода пластического течения, разработанного А.Л. Воронцовым, для всех указанных вариантов нового способа штамповки авторами были получены формулы, необходимые для их успешного проектирования и внедрения в производство, а также для выбора оптимальных параметров деформирования ещё на стадии предварительной технологической проработки.

Многочисленные эксперименты, проведённые с различной смазкой на заготовках разных типоразмеров, выполненных из алюминиевого сплава АВ, латуни Л63, а также коррозионно-стойкой жаропрочной стали 12Х18Н9Т (типовой образец представлен на рис. 5), показали успешные результаты с получением шероховатости отштампованных поверхностей, соответствующей тонкому шлифованию или полированию (заготовки из стали 12Х18Н9Т перед выдавливанием оксатируют и омыливали). Прочностные свойства и твёрдость материала выдавленных изделий в зоне выступа были повышены в 2–3 раза по сравнению с исходным материалом и, соответственно, с получением изделия резанием. При этом расхождение результатов расчёта силы выдавливания по полученным формулам с опытными данными не превышало 10%, что позволяет рекомендовать их для практического применения.

Таким образом, проведённое исследование показало большую эффективность предлагаемого нового способа выдавливания, а также надёжность и достоверность всех выведенных расчётных формул.



Рис. 5. Срез выдавленного образца из стали 12Х18Н9Т

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОРФОЛОГИЧЕСКОГО ПОДХОДА

Л.В. Гаврилина¹, М.А. Печейкина², Д.Л. Раков¹, Р.Ю. Сухоруков¹

¹Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; rdl@mail.ru

²Московский энергетический институт (Национальный исследовательский университет), Москва, Россия

В статье рассмотрены результаты теоретических и экспериментальных исследований, направленных на создание производственных интеллектуальных технологий формообразования деталей из жаропрочных сплавов в изотермических условиях. Приведен методологический подход к разработке технологии и оборудования для формообразования осесимметричных деталей из жаропрочных сплавов. На основе предложенного подхода проведена оценка технологий, оборудования и систем управления для изготовления заготовок.

В настоящее время в машиностроении большое внимание уделяется разработке интеллектуальных технологий формообразования деталей из жаропрочных сплавов в изотермических условиях. Этот процесс обеспечивает формирование однородной ультрамелкозернистой структуры в заготовках из данных сплавов.

Одним из критериев выбора технологии является получение материалов с заданной структурой [1,2]. В исследованиях, в частности, обращалось внимание на следующие ключевые факторы [3]:

- методы расчета кинетических, энергосиловых, термомеханических параметров оборудования для формообразования осесимметричных деталей в изотермических условиях;
- конечно-элементное моделирование процесса формообразования, состояния материала заготовки и инструмента, влияния температуры на жесткость инструмента [4];
- методы проектирования систем управления автоматизированным оборудованием;
- разработка и создание систем интеллектуального управления производственными технологиями;
- методы формообразования деталей из жаропрочных сплавов и "контроля" микроструктуры.

Интеллектуальный синтез автоматизированных систем управления (АСУ) играет важную роль в промышленной автоматизации. АСУ позволяют осуществлять оперативное программирование технологического процесса с автоматическим или ручным управлением, рассчитывать отклонение исполнительных органов на основе текущей информации о фактической нагрузке на вальцы, температуре нагревательной камеры с внесением необходимых корректировок в управляющую технологическую программу. Автоматизированная система управления обеспечивает автоматическую синхронизацию скоростей вращения шпинделей, формообразование детали по заданной программе при отображении на экране хода выполнения всех технологических операций и положения рабочих органов стана (дисплей

оператора и технолога) [5].

Автоматизированная система управления выполнена в виде многоуровневой распределенной системы управления:

- верхний уровень - контроллеры, управляющие ходом технологического процесса в целом и обеспечивающие человеко-машинный интерфейс.
- средний уровень - контроллеры, осуществляющие онлайн расчеты параметров скорости вращения валков и шпинделей, а также синхронизацию их работы, регулировку скорости движения прокатных головок в зависимости от изменения нагрузки.
- нижний уровень - контроллеры, управляющие скоростью вращения шпинделей и вальцов, а также контроллеры, управляющие движением кареток с раскатными головками.

Одной из особенностей первых этапов создания новых технологий является необходимость изучения большого количества вариантов. Чем больше вариантов анализируется, тем лучше исследование и тем больше уверенность в достижении цели. Для этого можно использовать морфологические подходы [6]. Эти методы подходят для широкого круга задач при решении проблем [7].

Морфологические методы основаны на комбинаторном подходе. Процедура морфологического анализа позволяет целенаправленно, систематически закладывать огромное количество вариантов в морфологические наборы технологических решений. Сначала формируется морфологическая матрица из известных решений, проектов, патентов [6]. В морфологическую матрицу вносятся одно или несколько эталонных решений, выбирается ряд критериев, которым присваиваются экспертные оценки.

В дальнейшем генерируется определенное количество альтернатив и формируется морфологическое множество решений, которое делится на кластеры (рис.2). Сначала исследуются решения кластера, в котором находится эталонный вариант. Технические решения сравниваются с эталонным вариантом, вы-

ясняется возможность его улучшения.

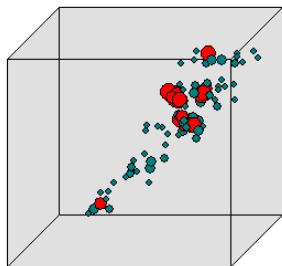


Рис. 1. Морфологический набор решений

Для оценки вариантов с помощью экспертных оценок была составлена матрица. Любой набор элементов всех признаков (по одному из каждой строки морфологической таблицы) является возможным вариантом технологии изготовления деталей. Мощность морфологического множества равна 1728 вариантам.

Были выбраны следующие признаки:

- Технологический процесс подготовки материала заготовки;
- Исходный материал заготовки;
- Структура материала заготовки;
- Температурный режим заготовки;
- Скорость деформации;
- Процесс изготовления заготовки.

В дальнейшем каждой альтернативе присваивался балл по каждому критерию. Было сгенерировано 480 вариантов, и 120 были отобраны для дальнейшей кластеризации. (рис. 2). Для всех вариантов была рассчитана мера сходства. Из 120 сгенерированных и отобранных вариантов было сформировано 18 кластеров (рис. 3).

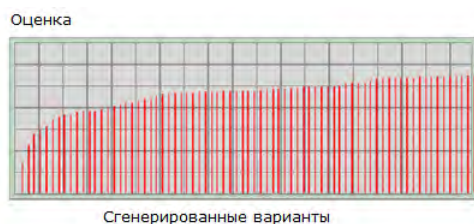


Рис. 2. Увеличение среднего балла отобранных вариантов

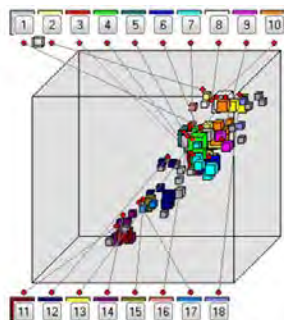


Рис. 3. Расположение кластеров в морфологическом поле растворов

Экспериментальные данные для отобранных вари-

антов были получены на экспериментальных станках СРЖД-800, АЛРД-800, СРВ, разработанных ИМАШ РАН, ИПСМ РАН и НИИД Объединённой двигателестроительной корпорацией в 2013-2020 гг. Они предназначены для изготовления образцов деталей из сплавов на основе титана и никеля, проведения исследований, испытаний и отработки режимов технологических процессов изготовления осесимметричных деталей типа дисков, колец, обечаек из различных жаропрочных сплавов в условиях сверхпластической деформации в ручном и автоматизированном режимах (рис.4-6) [5].



Рис. 4. Общий вид стана СРЖД-800 и автоматизированные технологические процессы



Рис. 5. Автоматизированная технологическая линия



Рис. 6. Раскатка заготовки в нагревательной печи

Преимущества созданной технологии:

- обеспечение оптимальных усилий для осу-

- шествления изотермического формообразования дисков из титановых и никелевых сплавов;
- улучшение механических свойств материала деталей за счет высокой степени однородности структуры и последующей термообработки;
- повышение производительности в 2-3 раза за счет реализации единого цикла процесса формообразования с использованием рабочей печи и печи для предварительного нагрева и термообработки заготовки;
- повышение коэффициента использования материала в 3-5 раз за счет снижения трудоемкости механической обработки заготовки;
- повышение надежности работы за счет использования отдельных гидравлических станций для основных узлов (каретки, ролики, пиноли);
- использование эффективной системы охлаждения пиноли, обеспечивающей зажим и вращение заготовки, а также охлаждение в подшипниковых опорах роликов инструмента;
- наличие системы определения касания роликами заготовки путем перемещения пинолей. Гидравлическая схема позволяет помимо точного позиционирования заготовки автоматически выполнять операцию ее сжатия;
- обеспечение контроля параметров формообразования и состояния основных узлов системой управления режимами, состоящей из 14 датчиков.

Система управления обеспечивает контроль и автоматическое поддержание следующих параметров [5]:

- температура заготовки на всех этапах, с начала ее установки в печь и до ее извлечения с точностью $\pm 5^\circ\text{C}$ в диапазоне от 200°C до 1140°C ;
- время выполнения каждой операции и полного технологического цикла;
- значения перемещений, подач инструмента (с точностью $\pm 0,5\%$);
- скорость вращения заготовки (с точностью $\pm 1\%$) в диапазоне от 0,05 до 4 об/мин;
- скорость вращения каждого из 4-х роликов инструмента (с точностью $\pm 0,1\%$) в диапазоне от 0,1 до 8 об/мин;
- усилия зажима заготовки в пинолях до 400 кН (с точностью $\pm 1\%$).

Синтезированные технологии являются современной альтернативой тем, которые в настоящее время используются при изготовлении валов не только на предприятиях России, но и в зарубежных компаниях (рис.7). Основными качественными показателями проекта являются значительное повышение коэффициента использования дорогостоящего металла до уровня 0,5-0,6, качества продукции за счет повышения механических свойств на 20-30%, снижение трудоемкости, мощности деформирующего оборудования и металлоемкости инструмента.



Рис. 7. Диски из сплава ВТ9

Предложенный подход обеспечивает уточнение и упорядочение задачи.

Предложенный подход позволяет качественно рассмотреть большое количество альтернативных технических решений и, с учетом ограничений, выбрать наиболее рациональные решения, расположенные вблизи эталонных.

На основе предложенного подхода проведена оценка технологий, оборудования и систем управления для изготовления заготовок длинных полых валов газотурбинных двигателей из жаропрочных никелевых и титановых сплавов. Общее количество возможных технологических решений в морфологической матрице составляет 1728 вариантов. Исследуемые варианты имеют высокие рейтинги, что позволяет сделать вывод о высоких технико-экономических показателях.

1. Valiev R, Enikeev N, Murashkin M. Superstrength of Ultrafine-Grained Aluminum Alloys Produced by Severe Plastic Deformation // Dokl. Ross. Akad. Nauk. 2010. 432(6). Pp.757–60.
2. Utyashev F, Raab G. Deformation methods for obtaining and processing ultrafine-grained and nanostructured materials. Ufa: Gilem. 2013.
3. Yeom J, Lee C, Kima J, Park N. Finite-element analysis of microstructure evolution in the cogging of an Alloy 718// Materials Science and Engineering. 2007. 449–451. Pp. 722–726.
4. Valiev R, Enikeev, Murashkin M. Using intensive plastic deformations for manufacturing bulk nanostructure metallic materials // Mech. Solids, 2012, Pp.463–74.
5. Афонин В.Л., Гаврилина Л.В., Ибрагимов А.Р., Кондратьев И.М., Морозов С.В., Раков Д.Л., Смоленцев А.Н., Сухоруков Р.Ю., Шитов А.М. "Исследования и разработка инновационных технологических процессов и интеллектуальных систем управления для изготовления деталей газотурбинных двигателей (ГТД). Москва, ФГБУН ИМАШ РАН - 2019.
6. Zwicky F. Discovery, Invention, Research - Through the Morphological Approach. Toronto. The Macmillan Company. 1969.
7. Klimenko B, Rakov D. Analysis and synthesis of innovative engineering solutions and technologies based on advanced morphological approach // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2018. 658. Pp.274-283.

К ВОПРОСУ О МЕХАНИКЕ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ СТРУКТУРЫ В ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВАХ

Л.В. Гаврилина¹, Р.Ю. Сухоруков¹, Ф.З. Утяшев²

¹Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; griboedova04@mail.ru

²Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа, Россия

Для изготовления деталей для газотурбинных двигателей из суперсплавов на основе никеля и железа используют сверхпластическую деформацию ультрамелкозернистых полуфабрикатов, что обеспечивает получение высококачественных изделий. Повысить эффективность производства объемных ультрамелкозернистых полуфабрикатов из суперсплавов (дисков, валов и т.д.) позволяет комбинированная деформация – кручение под давлением (растяжением).

В работе проведены результаты аналитических исследований принципиально иного подхода к изготовлению полуфабрикатов из жаропрочных сплавов по сравнению с гетерайзинг-процессом и процессом горячего изостатического прессования [1]. С этой целью рассмотрена механика интенсивной пластической деформации в процессах измельчения зерен в жаропрочных сплавах методом кручения с одноосным сжатием или растяжением в изотермических условиях воздушной среды [2].

Предложено теоретическое обоснование более эффективного процесса интенсивного пластического деформирования для получения ультрамелкозернистой структуры в изделиях из суперсплавов для газотурбинных двигателей. Показана возможность накопления необходимой для измельчения зерен степени деформации в условиях комбинированной деформации (осадка с кручением) в заготовках преимущественно за счет вклада ротационной составляющей (рис.1).

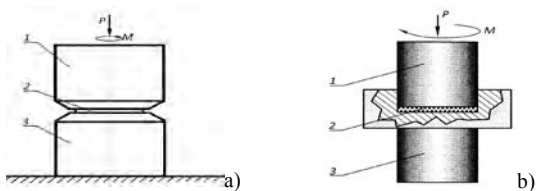


Рис. 1. Схема кручения диска под давлением:
а) в открытых бойках; б) в закрытых бойках;
1, 3- бойки, 2- диск

В работе определено напряженное и деформированное состояние заготовок при комбинированной пластической деформации кручением со сжатием и кручением. Аналитически описан механизм значительного снижения радиально составляющей силы и накопления необходимой степени деформации для формирования ультрамелкозернистой структуры в заготовке из жаропрочных сплавов [3, 4]. Получены зависимости относительной величины осевого усилия от относительной деформации и параметра, характеризующего роль кручения при растяжении или осадке образцов. Причем эти выражения получены с использованием реологических моделей для материалов нелинейно-вязкой и вязкопластической сре-

ды.

Расчеты для процессов осадки с кручением для материалов рассмотренных сред показали, что наблюдается эффект снижения осевого усилия деформации заготовки в 1,5 – 2,5 раза [3, 5, 6]. На рис.2 приведены варианты, полученные при различных соотношениях $e_2/e_1=k$, где e_1 – степень осевой деформации, e_2 – степень ротационной деформации.

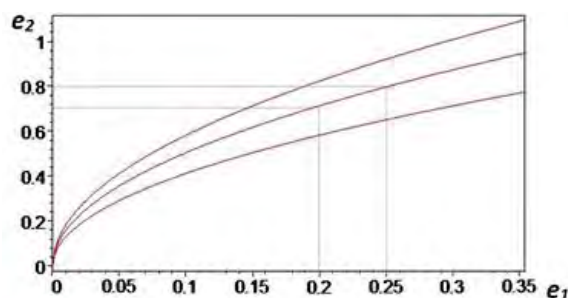


Рис.2. Траектория деформации:
нижняя при $k=1$, средняя при $k=2$,
верхняя при $k=3$

Следует отметить, что результаты аналитических исследований согласуются с данными отечественных и зарубежных источников. Кроме того, теоретические выводы подтверждены экспериментально на станах СРЖД-800 (для дисков) и СРВ (для полых валов), разработанных и изготовленных ИМАШ РАН, ИПСМ РАН в 2011-2021 гг. в рамках конкурсных проектов Минпромторга РФ и Минобрнауки РФ, а также хозяйственных договоров с предприятиями АО «ОДК»

В практическом плане использование процесса кручения под давлением в режиме сверхпластичности позволяет существенно упростить технологию, оборудование и инструмент для изготовления ультрамелкозернистых полуфабрикатов из суперсплавов [7, 9]. В результате значительно снижается сила деформации, развиваемая гидропрессом, что повышает стойкость штампового инструмента, существенно уменьшаются его размеры и количество операций для получения требуемой структуры практически до одной.

1. Кайбышев О.А., Утяшев Ф.З. Сверхпластичность, измельчение структуры и обработка труднодеформируемых сплавов. М. Наука. 2002. 438 с.
2. Смирнов О.М., Ершов Е.Н. и др. Влияние комбинированного нагружения на параметры штамповки плоских дисков в состоянии сверхпластичности. КИПП. 1997. № 1. С. 7-9
3. Утяшев Ф.З., Рааб И.Г. Деформационные методы получения обработки ультрамелкозернистых и наноструктурных материалов. Уфа. Гилем НИК Башк. Энцикл., 2013. 376 с. ISBN978-5-88185-115.
4. Сухоруков Р.Ю., Сидоров А.А., Утяшев Ф.З., Ибрагимов А.Р. Определение силовых параметров процесса изотермической раскатки ответственных деталей газотурбинных двигателей. //Проблемы машиностроения и автоматизации. 2015. № 1. С. 116-122.
5. Sukhorukov R. Yu., Sidorov A. A., Alimov A. I., Mukhtarov Sh. Kh., Utyashev F. Z. Physical and numerical modeling of the process of rolling off of a tapered shaft of aviation purpose. // Journal of Machinery Manufacture and Reliability, 2016. Vol. 45 (6). Pp. 538–545.
6. Burlakov I. A., Valitov V. A., Ganeev A. A., Sukhorukov R. Yu., Utyashev F. Z. Modeling the structure formation during hot deforming the billets of the parts of gas-turbine engines made of heat-resistant nickel alloy. // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2016. No. 45 (5). C/469-475.
7. Utyashev F.Z., Sukhorukov R.Yu., Samarukov G.V., Nagimov M.I. Specific features of rolling of shaft of gas turbine engine under conditions of superplasticity. // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2016. Vol. 45 (1)/ Pp. 65-71.
8. Utyashev F., Mulyukov R., Sukhorukov R., Valitov V., Sidorov A., Alimov A., Mukhtarov Sh. New technologies development and equipment for local shape-forming of the complicated parts made of heat-resistant alloys under superplastic deformation conditions. // Materials Science Forum Vols.838-839 (2016) Superplasticity in Advanced Materials – ICSAM 2015. Tokyo. Japan. 2016. pp. 615-620.
9. Афонин В.Л., Гаврилина Л.В., Раков Д.Л., Сухоруков Р.Ю., и др. Исследования и разработка инновационных технологических процессов интеллектуальных систем управления для изготовления деталей газотурбинных двигателей (научн. издание).М.: ИМАШ РАН. 2019. 87 с.

ЭВОЛЮЦИЯ СВОЙСТВ СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ИЛИ ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ НЕРЕГУЛЯРНОМ НАГРУЖЕНИИ

И.В. Гадолина, И.М. Петрова

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; gadolina@mail.ru

Рассмотрены теоретические и экспериментальные положения, связанные с эволюцией (деградацией) свойств металлов при нагружении их нерегулярным образом. Для суждения о данном процессе предложено понятие модифицированной кривой усталости. Данный подход позволит обоснованно использовать предварительно полученные экспериментальные данные по эксперименту при нерегулярном нагружении для уменьшения смещения последующих оценок долговечности аналогичных объектов.

Цель.

Разработать метод, позволяющий эффективно использовать предварительно полученную экспериментальную информацию по испытаниям при нерегулярном нагружении в лабораторном эксперименте. Оценка долговечности будет получена в замкнутой форме при линейном суммировании (Майнера) по модифицированной кривой усталости.

Введение.

Для расчета долговечности при нерегулярном нагружении исследователями неоднократно делались попытки (пример [1]) избежать как линейной гипотезы суммирования Майнера (иже со схематизацией случайных процессов), так и построения кривой усталости в классическом варианте с нагружением синусоидой. Следует констатировать, однако, что идея Майнера до сей поры жива и актуальна. Она логична, внутренне непротиворечива и зачастую приводит к адекватным оценкам долговечности. Главный ее недостаток — это смещение оценки. Для устранения этого смещения ранее была предложена корректированная гипотеза линейного суммирования [2]. Остановимся подробно на вопросе минимизации расчетных рисков, связанных с устранением смещения оценки по Майнеру.

Уточнение оценки неограниченного предела выносливости

У некоторого класса материалов при испытании при стандартной методике построения кривой усталости наблюдается так называемый неограниченный предел усталости $\sigma_{a\infty}$, т.е. некая величина амплитуды напряжений, которая не приводит к отказам при действии переменных напряжений в течение неограниченного периода времени. Следуя данной логике, в точке $\sigma_a = \sigma_{a\infty}$ кривая усталости претерпевает излом. Показано, однако, что область неограниченной долговечности существует не для всех вариантов материалов, конструкций и условий нагружения [3]. Ранее данной характеристике материала, уделялось весьма пристальное внимание, как при проведении испытаний, так и в расчетах [2]. Большое место дан-

ная характеристика нашла также в нормативных документах. Частично это связано с расчетом по запасам прочности в инженерной практике в минувшие годы.

Помимо класса материалов, отчетливо демонстрирующих неограниченный предел выносливости $\sigma_{a\infty}$ при испытаниях до относительно небольшой базы испытаний $N_6 < 5 \cdot 10^7$, известны материалы, не демонстрирующие данного предела. К таким материалам относятся легкие сплавы, стали с пределом прочности $\sigma_B > 1200$ МПа и композиты.

Проблема поведения кривой усталости в области сверхвысоких циклов $N > 10^8$ давно занимала умы ученых. В первую очередь это связано в том, что многие детали в процессе многолетней эксплуатации в процессе эксплуатации работают в области $N > 10^8$. В ИМАШ РАН были проведены испытания с $N_6 = 10^8$ циклов с частотой 100 Гц [4]. Те образцы, для которых ранее постулировался неограниченный предел усталости, после преодоления некоего «плато» в конечном итоге разрушались при $N > 5 \cdot 10^8$ и более [5]. В то же время, для экономии времени испытания при столь значительных базах проводят с ультразвуковыми частотами испытаний 20-30 кГц. Необходимо отметить, однако, механизм накопления повреждений различается при испытаниях с частотой нагружения до 200 Гц и сверхзвуковых. Так, в [6] были получены сильно отличающиеся долговечности (при ультразвуковых частотах долговечность оказалась значимо больше).

На Рис. 1 показаны результаты усталостных испытаний композитных образцов [5]. Исследования композитного материала (углеродное волокно / эпоксидная смола) были проведены при частоте испытаний $f = 965$ Гц и с асимметрией $R = 0,2$. По достижении числа циклов $N = 2 \cdot 10^9$ испытания прекращались (на рис.1 точки цензурированных испытаний дополнены стрелочками).

При внимательном рассмотрении Рис.1 можно заметить, что, при базе испытаний $N_6 = 10^7$, велик был бы шанс прийти к ошибочному выводу о существовании неограниченного предела выносливости на данной базе, что могло бы привести к ошибкам в оценке долговечности при нерегулярном нагружении. Рассмотрение проблемы учета цензурированных образцов в данном примере содержится в [7].

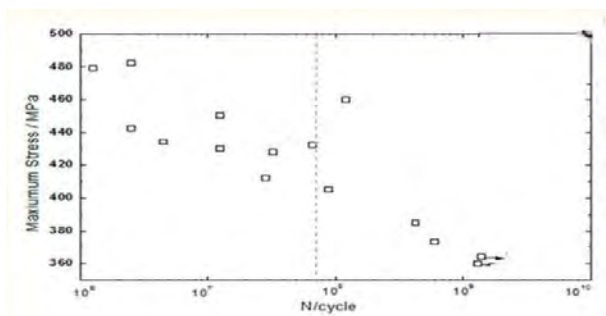


Рис. 1. Кривая усталости композитных образцов, построенная с применением испытаний на ультразвуковых частотах [5китай].

Определение долговечности для материалов, не имеющих выраженного предела выносливости удобно проводить с помощью метод учета снижения предела выносливости предложенного Серенсеном С.В. и Когаевым В.П. [8]. Алгоритм расчета [8]. учитывает постепенное снижение предела выносливости вследствие циклического нагружения и увеличении динамических нагрузок вследствие износа и обосновывается формулой:

$$\sigma_{-fi} = \sigma_{-fi-1} \left[1 - \frac{n_i}{N_i} k \left(\frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{-fi-1}} - 1 \right) \right] \quad (1)$$

где σ_{-1} - предел выносливости исходного материала, соответствующей базе 10^7 циклов, не подвергавшегося предварительному нагружению; k - параметр, характеризующий интенсивность снижения предела выносливости от предварительного нагружения; N_i - число циклов по кривой усталости исходного материала, соответствующее амплитуде нагружения σ_{ai} , i - номера ступеней в блоке нагружения.

Основная или исходная кривая усталости является результатом проведения испытаний при гармоническом нагружении; вторичная кривая усталости [2], представляет результат испытаний при нерегулярном нагружении, в англоязычной литературе иногда называется кривая Гасснера [9]; модифицированная кривая усталости - расчетно-экспериментальная, полученная на основании математического анализа результатов испытаний при нерегулярном нагружении. По форме модифицированная совпадает с исходной, но константы уравнения уточняются по результатам испытаний при нерегулярном нагружении [10].

Приведем пример, поясняющий идею модифицированной кривой усталости.

Испытания стальных образцов проводились при 7-ступенчатом (3) и при 5-ти ступенчатом укороченном блоке (4) с отбрасыванием двух нижних ступеней нагружения [11], см. рис.2. Экспериментальные долговечности, выраженные в числе блоков до разрушения, значительно отличаются. Если при оценке по линейной гипотезе использовать исходную кривую усталости, обозначена (1) на рис.2, то расчетные долговечности для исходного и укороченного блоков совпадут по причине того, что две отброшенные

нижние ступени при использовании линейной гипотезы Майнера не дадут повреждения, так как их амплитуды ниже неограниченного предела выносливости, соответствующего точке перелома исходной кривой (1). Сопоставление результатов испытаний при блочном нагружении (3) и (4) позволяет сделать вывод о характере кривой, более приближенном к реальности в соответствии с расчетом: это продолженная ниже предела выносливости - линия 2 на рис. 2.

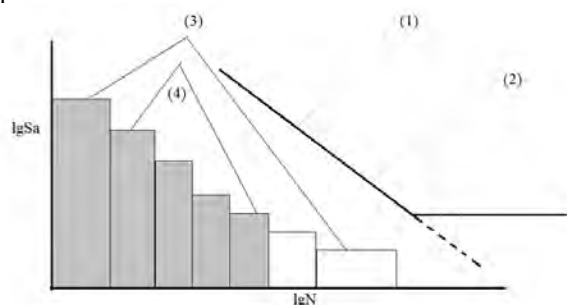


Рис. 2. Эксперимент на усталость с нагружением блоками двух видов: 1- исходная кривая усталости; 2 - экстраполированная; 3- 8-ми ступенчатый блок для испытаний; 4 - 6-ти ступенчатый, укороченный.

Модифицированная кривая усталости не всегда совпадает с продолженной ниже предела усталости кривой, для ее построения используется более сложный математический алгоритм, а именно:

Метод построения модифицированной кривой усталости

Многими исследователями неоднократно было отмечено, что при оценке долговечности при нерегулярном (т.е. блочном или случайном) нагружении в эксперименте или эксплуатации линейной гипотезы накопления повреждений Майнера:

$$D = \sum d_i = 1 \quad (2),$$

приводит к систематической ошибке определения медианного ресурса. Другими словами, по результатам лабораторного или эксплуатационного эксперимента на момент разрушения исследователи получают [2, 9].

$$D = \sum d_i \neq 1 \quad (3).$$

В (2) и (3) d_i - это относительное повреждение на i -той ступени нерегулярного блока:

$$d_i = n_i / N_i \quad (4),$$

где n_i - число циклов с амплитудой σ_{ai} до разрушения. Здесь и далее рассмотрен вариант записи кривой усталости в форме Баскуина [2]:

$$\lg(N) = A - m \lg(\sigma_a) \quad (5).$$

Модифицированная кривая усталости - это преобразованное некоторым образом уравнение исходной кривой усталости (5), так, что оно минимизирует ошибку предсказания долговечности. Ее уравнение запишем в виде

$$\lg(N) = A^* - m^* \lg(\sigma_a) \quad (6),$$

где A^* и m^* определяются из решения системы уравнений по минимизации расчетной ошибки расхождения:

$$\Psi = \sum_{i=1}^k [\lg (\sum_{j=1}^w n_{ij}(\sigma_{ij})^{m^*} - A^*)^2] \quad (7)$$

где k - число опытов при нерегулярном нагружении; w - число ступеней в блоке.

Для построения модифицированной кривой усталости необходимы экспериментальные данные испытаний при нерегулярном нагружении как минимум на двух уровнях нерегулярного нагружения с аналогичным спектром амплитуд. Потребуется также подробное описание спектра и сведения о наработках при нерегулярном нагружении. В каждом опыте на одном уровне нагружения желательно испытывать несколько образцов для уменьшения влияния разброса. Оценку предлагается проводить по медианному значению наработки до отказа.

Для поиска неизвестных с помощью минимизации расхождения Ψ в уравнении (7) можно использовать стандартный алгоритм метода наименьших квадратов, реализованный в программе MATLAB 6.5. Для поиска приближения, близкого к точке минимума функции ошибки, использовали метод адаптивного случайного поиска.

На рис. 3 показана зависимость логарифма суммарной ошибки Ψ уравнения (7) от параметров m и A , т.е. пример поверхности ошибки для опыта с испытаниями лабораторных образцов о исходному и укороченному блокам [11]. Искомые значениями m^* и A^* являются точки, для которых значение Ψ (невязка нелинейного уравнения) минимальна.

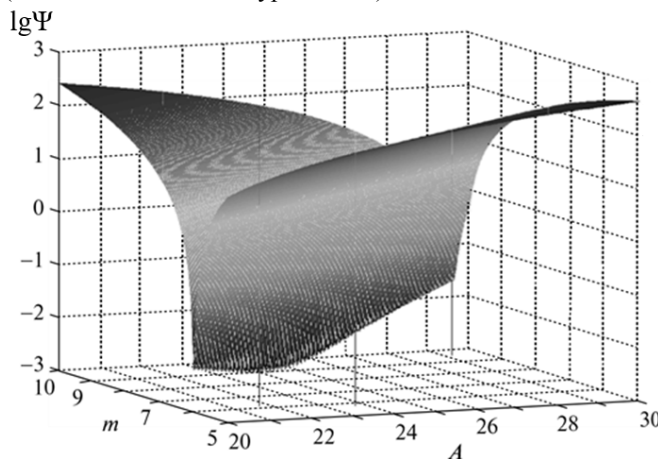


Рис. 3. Поверхность ошибки для опыта с нерегулярным нагружением.

Выводы.

На основании исследований литературных данных и собственных опытов авторов, сделан вывод об изменении характера кривой усталости под действием периодических перегрузок, неизбежных в эксплуатации.

Предложена концепция расчетно-экспериментальной модифицированной кривой усталости, которая позволит учесть имеющиеся данные об испытаниях и получить несмещенную оценку по Майнеру в замкнутой форме.

1. Erpalov AV, Shefer LA. Fatigue-based Classification of Loading Processes. *Procedia Engin.* 2016;150:144-9. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.737>
2. Кобаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях переменных во времени. М., Машиностроение, 1993. 364 с.
3. Bathias C. There is no infinitive fatigue life in metallic materials/ *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.* 1999. v 22. #7. P.559-566.
4. И.М.Петрова. Накопление усталостных повреждений в области сверхвысоких долговечностей при нерегулярном нагружении. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов №7. 2012. Том 78. с. 61-64.
5. Wei Xu et al. An Ultra-High Frequency Vibration-Based Fatigue Test and Its Comparative Study of a Titanium Alloy in the VHCF Regime. *Metals* 2020, 10, 1415; doi:10.3390/met10111415
6. Wenbin Cui et al. 2020 Very High Cycle Fatigue (VHCF) Characteristics of Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP) under Ultrasonic Loading Materials. Basel, Feb; 13 4 p 908. Published online Feb 18. doi: 10.3390/ma13040908
7. Гадолина И.В., Майданов И.С., Смелов С.А., Сулова Ю.В. Методика учета цензурированных образцов при испытаниях композитов на усталость/Надежность. 2021. Т. 21. № 1. С. 4-10.
8. Серенсен С.В., Кобаев В.П., Шнейдерович Р.М. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность. М.: Машиностроение. 1975. 488 с.
9. Sonsino CM, Heim R, Melz T. Lightweight-Structural Durability Design by Consideration of Variable Amplitude Loading, *Int. J. Fatigue.* 2016; 92 (Pt. 2): 328-336. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.07.030>
10. Makhutov N.A., Petrova I.M., Gadolina I.V., Kulakov A.V. On peculiarities in construction of a modified fatigue curve/*Journal of Machinery Manufacture and Reliability.* 2010. T. 39. № 4. С. 338-342.
11. Кобаев В.П., Гадолина И.В. Расчет деталей машин при нерегулярном режиме нагружения/Проблемы машиностроения и надежности машин. 1991. № 5. С. 45.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВОЛНОВЫХ РЕЗОНАНСНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ПРОЦЕСС ПОЛУЧЕНИЯ НАНОЧАСТИЦ КРАХМАЛА

С.Р. Ганиев¹, В.П. Касилов¹, О.Н. Кислогубова¹, О.А. Бутикова¹,
Н.Е. Кочкина^{1,2}

¹Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

²Институт химии растворов им. Г.А. Крестова РАН, Иваново, Россия

Наночастицы крахмала (НЧК) получены методом осаждения этанолом с использованием интенсифицирующих волновых резонансных воздействий. Анализ НЧК выполнен методами динамического рассеяния света, сканирующей электронной микроскопии и рентгенофазового анализа. Установлено, что использование волновых воздействий в ходе формирования НЧК способствует уменьшению их размера в сравнении с НЧК, полученными традиционным способом с помощью лопастной мешалки.

НЧК представляют собой функциональный материал, для получения которого в качестве источника сырья используют экологически чистый, широкодоступный, биосовместимый и возобновляемый природный биополимер. НЧК находят широкое применение в пищевой промышленности, косметологии, медицине и других отраслях. Область практического применения крахмальных наночастиц определяется их размерами, которые главным образом зависят от способа получения.

Существуют различные методы получения НЧК – кислотный или щелочной гидролиз крахмала, его ферментативная деградация, различные виды физического и механического воздействия на биополимер, а также их сочетание.

Более высокоэффективным способом получения полисахаридных НЧ является метод осаждения, представляющий собой щадящую химическую обработку гелей крахмала, для проведения которой не требуются токсичные растворители и дополнительные энергозатраты. Способ основан на постепенном добавлении разбавленного раствора полимера к осадителю, или наоборот, при непрерывном механическом перемешивании, в результате чего происходит образование наноразмерных частиц полимера. В качестве осадителя чаще всего используют этанол путем его медленного прикапывания в разбавленную дисперсию клейстеризованного крахмала при непрерывном механическом перемешивании.

Известно [1, 2], что интенсифицировать процессы массопереноса в жидкофазных системах возможно с помощью волновых эффектов, проявляющихся при сформированных за счет волновых воздействий режимах течения сред, обрабатываемых в волновых аппаратах и установках.

В данной работе впервые оценена возможность формирования НЧК методом осаждения этанолом с использованием волновых резонансных воздействий.

В работе использовали картофельный крахмал (ГОСТ Р 53876-2010) и этиловый спирт (ГОСТ 33881-2016). НЧК получали из крахмального клейстера, к которому медленно (~1 мл в мин.) прикапывали этанол в соотношении 1:1 при непрерывном механическом перемешивании на разработанном в

НЦ НВМТ РАН волновом смесителе ВМ-58 с электромеханическим резонансным генератором колебаний [3, 4]. В качестве образцов сравнения были получены НЧК с использованием лабораторной лопастной мешалки ER 10. НЧК выделяли центрифугированием с последующей лиофильной сушкой.

Оценку процесса формирования НЧК проводили методом динамического рассеяния света (ДРС) на приборе Zetasizer Nano ZS (Malvern Instruments Ltd, UK). Полученные данные представлены на рис 1.

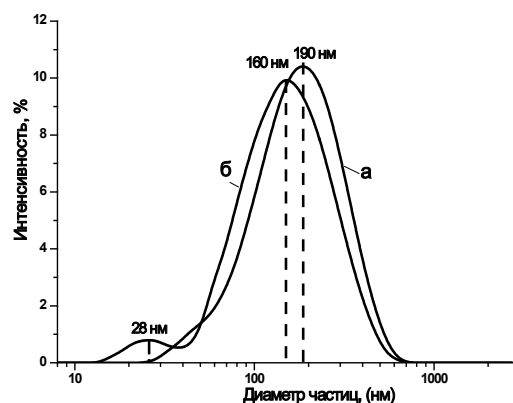


Рис 1. Распределение по размерам НЧК, полученных традиционным способом с помощью лопастной мешалки (а) и волновых резонансных воздействий (б)

Установлено, что распределение по размерам НЧК, полученных методом осаждения с помощью механической мешалки ER 10 является мономодальным. Модальное значение диаметра НЧК составляет 190 нм. Применение интенсифицирующих волновых воздействий на стадии прикапывания этанола к клейтеризованной крахмальной суспензии приводит к уменьшению размера формируемых НЧК. Данный образец характеризуется бимодальным распределением по диаметрам частиц с модами соответствующими гидродинамическим диаметрам 28 и 160 нм.

Таким образом, в работе впервые показана возможность получения НЧК методом осаждения этанолом, интенсифицированным волновыми резонансными воздействиями. Сформированные НЧК охарактеризованы методами ДРС, СЭМ и РФА. Установлено, что применение волновой технологии в процессе получения НЧК позволяет снизить их

размер в сравнении с НЧК, сформированными путем непрерывного механического перемешивания системы крахмал/этанол традиционным способом с помощью лопастной мешалки.

1. Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е. Нелинейная волновая механика и технологии. – М.: Научно-издательский центр «Регулярная и хаотическая динамика», 2008. – 712 с.;
2. Р.Ф. Ганиев, Ганиев С.Р., Касилов В.П., Пустовгар А.П. Волновые технологии в инновационном машиностроении, Москва: Институт компьютерных исследований, 2014, стр. 106;
3. Касилов В.П., Курменев Д.В. Волновые технологические машины и аппараты с электромеханическими резонансными генераторами колебаний и волн // Машины, технологии и материалы для современного машиностроения. Сборник тезисов конференции. 2018. С. 76;
4. Касилов В.П. Электромеханические резонансные генераторы колебаний. Анализ рабочего процесса // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2016. № 2. С. 33-42.

ФОРМИРОВАНИЕ ТВЕРДЫХ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ

А.В. Горин, И.В. Родичева, Н.В. Токмаков

Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, Орел, Россия; gorin57@mail.ru

В статье представлена информация по образованию модифицированных поверхностей трения. Приведены результаты анализа применяемых антифрикционных пленочных покрытий. Одной из главных проблем нанесения тонких пленочных покрытий является отсутствие технологических режимов, рекомендованных производителем. Описан состав пленочного антифрикционного покрытия. Представлены результаты экспериментальных исследований нанесения тонких пленочных покрытий. Выбран пневматический распылитель для нанесения тонких пленочных покрытий. Проведены серии экспериментов по выявлению технологических режимов нанесения тонких пленочных покрытий. Выполнен качественный и количественный анализ результатов нанесения тонких пленочных покрытий. Предложена функциональная схема нанесения антифрикционного пленочного покрытия. На основе выполненных выводов даны рекомендации по технологическим режимам нанесения тонких пленочных антифрикционных покрытий на модифицированную поверхность трения.

Цель

Одним из основных критериев выбора при покупке узла, агрегата или автотранспортного средства являются его надежность, которая складывается из долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости. Последнее время в узлах и механизмах часто используются модифицированные поверхности трения, которые представляют собой детали с различными видами покрытий. Такие поверхности повышают надежность и увеличивают срок службы деталей и механизмов [1]. При этом такие детали очень часто представляют собой многослойные изделия, состоящие из стального основания с последующим нанесением на него покрытия. Свойства покрытия зависят от материала и способа его нанесения. Необходимо учесть, что свойства наносимого покрытия должны полностью соответствовать условиям эксплуатации данной детали [2]. Применяемые при техническом обслуживании и ремонте машин покрытия, по своему назначению, принято подразделять на следующие основные группы: износостойкие, лакокрасочные, антифрикционные, коррозионностойкие, жаростойкие. В большинстве случаев при нанесении покрытий происходит изменение габаритных и присоединительных размеров. Размеры деталей увеличиваются на толщину наносимого слоя покрытия. Во многих случаях, это недопустимо [3], так как приводит к изменению технических параметров узлов и деталей.

Материалы и методы

Данную проблему позволяет решить применение новых материалов, в частности пленочных покрытий (толщина пленочного слоя составляет от 5 мкм до 30 мкм) которые позволяют значительно повысить работоспособность деталей машин.

При изготовлении, техническом обслуживании и ремонте последние годы используются различные пленочные покрытия. В данный момент имеется огромная номенклатура пленочных покрытий. Их можно разделить по способу нанесения, составу, свойствам, назначению и т.д. Немало важным фактором является и цена покрытия такого типа. Потребитель оказывается в сложной ситуации при вы-

боре того что ему необходимо. Основная проблема заключается в том что, необходимо выбрать покрытие, которое будет выполнять свои функции, легко наноситься на поверхность изделия, не требуя сложных приспособлений и оборудования и при этом иметь высокую адгезионную прочность сцепления с основным металлом [4,5]. Обычно производитель не описывает технологический процесс нанесения покрытия. В прилагаемых к покрытиям документах не указаны основные режимы, которые влияют на трибологические свойства сформированного пленочного покрытия [6,7].

Пленочные антифрикционные покрытия после формирования на поверхностях трения являются твердыми на ощупь, по виду они похожи на лакокрасочные покрытия. Пленочные антифрикционные покрытия содержат твердые смазочные материалы в качестве пигментов, смолы в качестве связывающего вещества, а также жидкость-растворитель. В качестве пигментов преимущественно применяют дисульфид молибдена, графит и ПТФЭ.

Основополагающим фактором для обеспечения смазывающей способности покрытия в процессе эксплуатации, помимо выбора отдельного компонента, является также объемная концентрация пигментов в составе покрытия. Пленочные антифрикционные покрытия наносятся преимущественно методом распыления, на предварительно обезжиренные поверхности, также возможно нанесение галтованием, погружением в центрифугу, электростатическим и автоматическим методом распыления, нанесение печатным способом, вальцеванием с последующей сушкой при комнатной температуре или в печи.

Универсальным инструментом для нанесения пленочных антифрикционных покрытий является пневматический распылитель. Данный вид нанесения покрытий является наиболее простым и доступным. Работа данного инструмента заключается в том, что антифрикционный материал, подающийся в распылитель и выходящий из его сопла, разбивается на мелкие частицы потоком сжатого воздуха, «выстреливающего» с большой скоростью из отверстий воздушной головки. В результате образуется так называемый «факел», состоящий из частичек материала, движущихся по направлению к об-

рабатываемой детали или поверхности. Долетев до поверхности, частички оседают на ней, формируя покрытие. На качество нанесения данного покрытия в большей степени будет влиять процесс формирования «факела», который в свою очередь будет зависеть от расстояния пневмораспылителя до детали и скорости выходного потока воздуха.

Для определения влияния дистанции и скорости на качество нанесённого покрытия был проведен натурный эксперимент. Задачей эксперимента являлось получить оптимальные значения скорости воздуха и дистанции нанесения покрытия для получения качественного покрытия при его максимальном переносе. Для проведения эксперимента был подготовлен краскопульт Константа А, представленный на рисунке 1.



Рис. 1. Пневматический распылитель для нанесения покрытий Константа А

Наносимое пленочное антифрикционное покрытие на основе дисульфида молибдена (12%) с органическим связующим, отверждаемое при нормальной температуре. Для измерения скорости воздушного потока использовался ареометр.

Для установки ареометра и пневматического распылителя использовался штатив. Замеры расстояния проводились с помощью металлической линейки ГОСТ 427-75.

Оптимальный параметры нанесения пленочного антифрикционного покрытия определяли по отпечатку факела. При правильном подборе всех параметров, отпечаток факела должен представлять собой четкий, сильно вытянутый овал равномерно нанесенного пленочного покрытия (возможно, с небольшой размытостью краев). Его боковые стороны ровные, без каких-либо выступов и впадин, а нанесенный материал равномерно распределен по всей площади пятна.

Результаты и обсуждения

В ходе проведенных экспериментов была получена функциональная схема нанесения антифрикционного пленочного покрытия, представленная в виде диаграммы на рисунке 2.

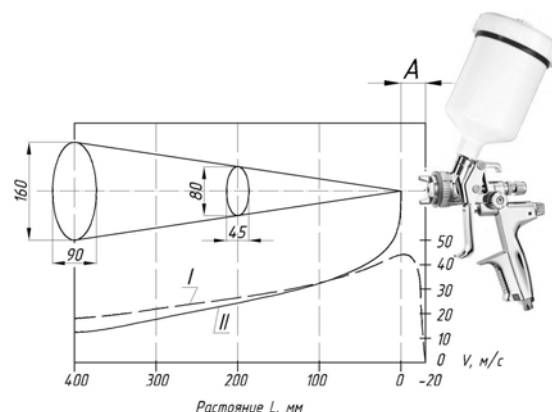


Рис. 2. Диаграмма нанесения антифрикционного пленочного покрытия

Анализ графиков полученных зависимостей показывают, что на изменение прочности сцепления доминирующее влияние оказывает изменение количественных значений величины дистанции нанесения покрытия. Вторым по значимости фактором, влияющим на прочность сцепления, является шероховатость поверхности. Угол нанесения покрытия оказывает наименьшее влияние на прочность сцепления.

Выводы

Представленный выше материал позволяет сделать следующие выводы:

- Нанесение тонких пленочных покрытий является перспективным способом создания модифицированных поверхностей трения;
- Для получения требуемых трибологических свойств модифицированных поверхностей трения необходимо знать технологические режимы нанесения тонких пленочных покрытий;
- Оптимальное расстояние для формирования пленочных антифрикционных покрытий составляет 180 – 200 мм;
- Скорость воздуха при этом составляет 24 - 28 м/с;

1. Газотермические покрытия из порошковых материалов. Справочник / Ю.С. Борисов, Ю.А. Харламов, С.Л. Сидоренко, Е.Н. Ардатовская — Киев: Наукова думка, 1987.
2. Ярошевич В.К., Белорецкий М.А. Антифрикционные покрытия из металлических порошков. — Минск: Наука и техника, 1981. — 175 с.
3. Кутяков А.А. Износостойкие и антифрикционные покрытия. — М.: Машиностроение, 1976. — 152 с.
4. Zhao Meng, Xue-feng Zhang, Jingchao Zhang, Bin Hu, Yun Yang Application study of nano-copper based composite anti-friction coating for corrosion resistant couplings. Journal of Petroleum Science and Engineering, Volume 157, August 2017, P. 1143-1147.
5. Rodichev A. Y., Gorin A. V., Tokmakov N. V. 2020. Formation of film antifriction coatings on the friction surfaces of machine parts. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering ICMTMTE 2019, 2020, Volume 709, Issue 1, 022053.
6. Gorin A. V., Rodichev A. Y., Tokmakova M. A. 2019. Adhesive strength research of film antifriction coatings. Materials Today: Proceedings, Volume 19, Part 5, 2019, P. 2329-2332.

КОМПЛЕКС ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ НА АБРАЗИВНОЕ ИЗНАШИВАНИЕ

С.С. Грядунов¹, В.В. Сиваков²

¹Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия

²Брянский государственный инженерно-технологический университет, Брянск, Россия; sv@bgitu.ru

Проведено описание конструкций установок, реализующих методы испытаний материалов на изнашивание закрепленным (шлифовальная шкурка) и незакрепленным (слой абразива) абразивом при отрицательных и повышенных температурах.

Абразивное изнашивание является основной причиной выхода из строя деталей машин и оборудования, контактирующих в процессе эксплуатации с абразивом, особенно в условиях отрицательных температур. Оно характерно для строительной и землеройной техники, горнодобывающего и горнообогатительного оборудования, породомеляющих агрегатов и породоразрушающего инструмента и т.д. Долговечность изнашиваемых деталей зависит от свойств и структуры их поверхностных слоев, силовых и кинематических параметров процесса контактирования, вида абразива и его закрепленности и многих других факторов, влияющих на процессы в зоне фрикционного контакта «металл-абразив». Вследствие этого особое значение для изучения механизма и закономерностей изнашивания материалов указанных деталей приобретают методы испытаний на изнашивание абразивом [1]. При проведении испытаний необходимо вопроизведение таких важных факторов, как температурный режим, свойства и закрепленность абразива, схема контактного взаимодействия материала и абразива, удельные нагрузки в зоне трения и т.д. Оборудование для испытаний на изнашивание абразивом [2] должно обеспечивать возможность моделирования указанных факторов, контроля и поддержания в заданных пределах параметров процесса изнашивания.

Приведено краткое описание комплекса оборудования для испытаний материалов на изнашивание абразивом, состоящего из установок, использование которых позволяет реализовать различные схемы взаимодействия материала и абразива, степени закрепленности абразива и температуры испытаний.

Универсальная установка для испытаний материалов на изнашивание закрепленным абразивом реализует схемы испытания при ударе, трении с ударом и трении по шлифовальной шкурке в условиях отрицательных и повышенных температур. Применение шлифовальной шкурки обеспечивает возможность проведения испытаний по возобновляемой абразивной поверхности и получение сопоставимых и достоверных результатов. Установка содержит станину, нагружающий механизм с системой управления, механизм перемещения абразивной ленты, теплоизолированную камеру с установленным в ней испытываемым образцом, систему под-

держания заданной температуры (низкой до 213К и повышенной до 373 К).

Кинематическая схема установки приведена на рис.1. Нагружающий механизм включает ударник 1, в котором закреплен контробразец 2 и сменные грузы 3. При испытаниях на удар или трение с ударом ударник соединяется с сердечником соленоида 4, при включении и выключении которого посредством таймера в соответствии с программой испытаний ударник поднимается и падает, обеспечивая ударное нагружение образца 5. При испытаниях на трение ударник отсоединяется от сердечника соленоида и давление на образец реализуется за счет массы сменных грузов. При испытаниях на трение с ударом необходимо варьирование параметров процесса изнашивания - давления и энергии удара, поэтому в установке предусмотрено изменение высоты падения ударника. Оно обеспечивается вертикальным перемещением траверсы 7, на которой закреплен соленоид, посредством передачи «винт-гайка» 8, приводимой в движение мотор-редуктором 10 через сменную передачу 9. Частота ударов и время контактирования контробразца и образца при ударе через абразивную ленту задаются таймером.

Механизм перемещения абразивной ленты обеспечивает прерывистое, с заданным шагом движение ленты в случае испытаний при ударе и непрерывное, с заданной скоростью движение в случае испытаний при трении и трении с ударом. Конструктивно механизм перемещения выполнен следующим образом. От электродвигателя постоянного тока 11 (тип П-11, мощность 0,7 кВт) вращение через червячный редуктор 12 передается на двухручьевой шкив 13 и от него через клиноременные передачи на шкивы 14 и 15. Шкив 14 неподвижно закреплен на валу и приводит во вращение кулачок 16. Шкив 15 может свободно вращаться на валу и соединяться с ним при помощи выдвижной шпонки.

При испытаниях при ударе шпонка выдвигается, периодическое перемещение ленты осуществляется при помощи кулачка 16, вращение которого обеспечивает качательное движение рычага 17 и, соответственно ему, колебательное движение храпового колеса при помощи собачки 18 храпового механизма. В результате осуществляется периодический поворот вала на угол, заданный геометрией

кулачка и соотношением плеч рычага. При проведении испытаний перемещение ленты 23 при помощи металлического 20 и прижимного резинового ролика 19 осуществляется во время подъема ударника, а удар происходит по неподвижной абразивной ленте за счет синхронизации работы механизма перемещения ленты и системы управления нагружающим механизмом.

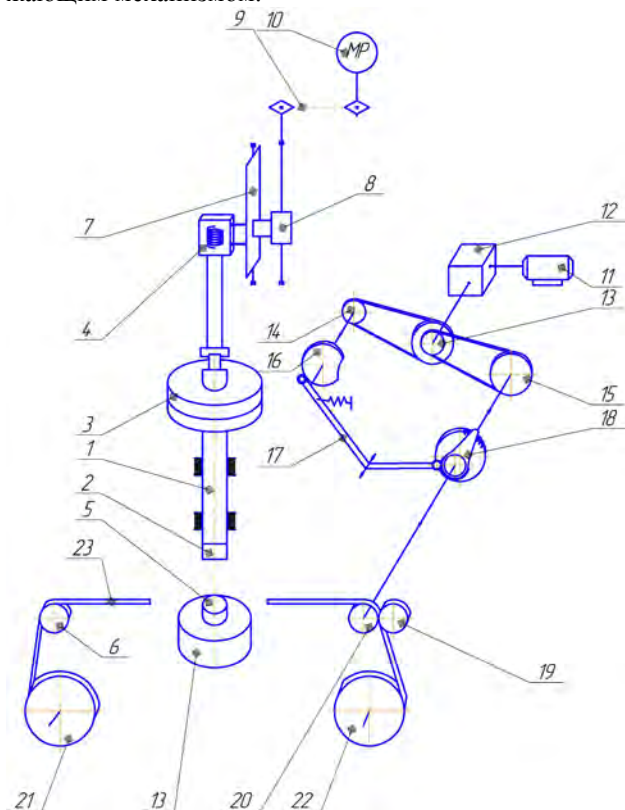


Рис.1. Кинематическая схема универсальной установки

При испытании на трение и трение с ударом по абразивной поверхности рычаг отводится от кулачка, шкив соединяется с валом выдвигной шпонкой, обеспечивая непрерывное вращение ролика 20 и, соответственно абразивной ленты 23 с заданной скоростью. Абразивная лента из подающей кассеты 21 после отработки поступает в приемную кассету 22 при помощи фрикционного механизма намотки.

Для периодического выдувания продуктов износа и разрушенных частиц абразива при испытаниях при ударе предусмотрено использование сжатого воздуха, подаваемого под давлением от компрессора после его осушения прокачкой через емкость, наполненную гранулированным хлористым кальцием. При испытаниях в условиях низких температур воздух дополнительно пропускается через холодильную камеру TV-1000, где охлаждается до температуры 263-253K.

Система автоматического поддержания температуры испытаний управляется сигналом, поступающим от термопары, закрепляемой вблизи торца испытываемого образца. Она включает блоки поддержания низкой и повышенной температуры. При испытаниях в условиях низких температур охла-

ждение образца до заданной температуры обеспечивается подачей паров жидкого азота во внутреннюю полость теплоизолированной камеры. Блок поддержания низкой температуры состоит из двух систем – системы создания избыточного давления в сосуде Дьюара и системы управления подачей охлаждающей среды. Блок обеспечения повышенной температуры включает нагреватель, размещенный в теплоизолированной камере, и систему управления работой нагревателя.

Для обеспечения работы в автоматическом режиме установка снабжена сигнализатором обрыва ленты.

Для реализации метода испытаний материалов на изнашивание при ударе по незакрепленному абразиву разработана установка, использующая в своей конструкции нагружающий механизм (без регулировки по высоте) и систему поддержания температуры испытаний, применяемые в ранее описанной установке. Кинематическая схема установки приведена на рис.2. Помимо описанного ранее нагружающего механизма, она содержит стол 6, к которому снизу прикреплена теплоизолированная камера 7 с установленным в ней образцом 5, систему подачи абразива и механизм, обеспечивающий получение слоя абразива заданной толщины и удаление его после удара, систему поддержания температуры образца.

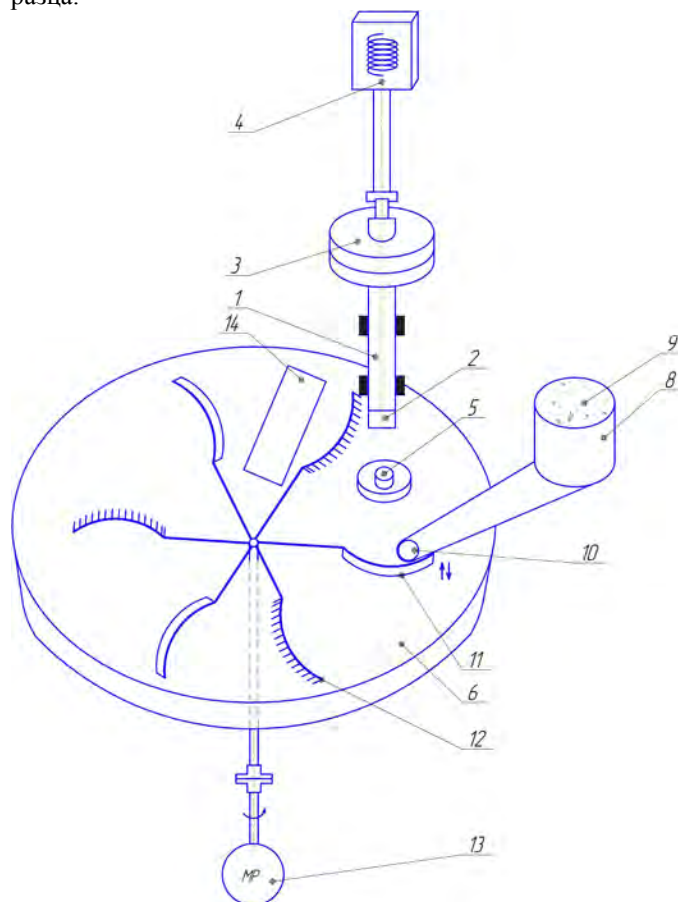


Рис.2. Кинематическая схема установки для испытаний при ударе по незакрепленному абразиву

Система подачи абразива включает бункер 8 и дозатор 10, обеспечивающий выдачу с заданной частотой определенной порции абразива 9. Механизм, формирующий слой абразива заданной толщины и удаление его после удара состоит из чередующихся гребенок 11 и щеток 12, вращающихся с заданной скоростью посредством мотор - редуктора 13 (тип АИР 6302, мощностью 0,55 кВт).

Гребенки 11 настраиваются по высоте, обеспечивая при вращении разравнивание порции абразива из дозатора 10 на заданную толщину слоя частиц над испытываемым образцом 5. После этого происходит удар контробразцом 2 по образцу 5 через слой абразива, ударник 1 поднимается и движущуюся следом щетка 12 удаляет абразив с поверхности образца и стола, сметая его в специальную щель 14 в столе. Схема крепления теплоизолированной камеры к столу приведена на рис.3.

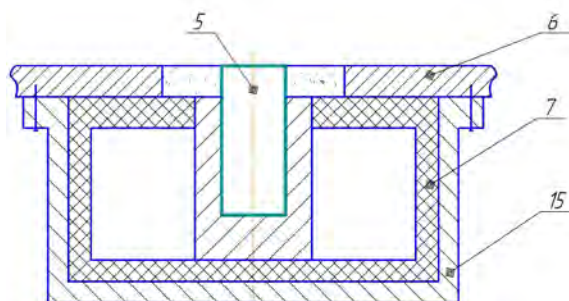


Рис.3. Схема крепления теплоизолированной камеры к столу

Торец образца 5 должен совпадать по плоскости с поверхностью стола 6. Теплоизолированная камера 7 находится в корпусе 15, жестко прикрепляемом к столу 6.

Энергия удара регулируется массой сменных грузов 3, частота ударов задается таймером и синхронизируется с работой механизмов по подаче, разравниванию и удалению абразива. Температура испытаний обеспечивается системой поддержания температуры, описанной ранее.

1. Грядунов С.С., Сиваков В.В. Изнашивание хромованидиевых сплавов при трении с ударом по абразивной поверхности // Научные труды VI Международной научной конференции "Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении". 2019. С. 136-138.
2. Патент на изобретение RU 2691639. Установка для испытания материалов на абразивное изнашивание // Грядунов С.С., Сиваков В.В. Дата регистрации 24.02.2018 г.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ МЕХАНИЗМА НАГРУЖЕНИЯ РОЛИКОВЫХ МАШИН ТРЕНИЯ

Г.В. Даровской, В.Н. Поляков

ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения», Ростов-на-Дону, Россия;
graffDAROVSKOI@yandex.ru

Разработана новая конструкция механизма нагружения рычажного типа для машин трения типа «Амслер», которая повышает точность определения коэффициента трения при в условиях малых и больших нагрузок, позволяет существенно снизить биение роликовых образцов. Представлены результаты аттестации механизма нагружения с помощью специально разработанной динамометрической скобы СД-2.

Цель

Разработка новой конструкции механизма нагружения рычажной конструкции для роликовых машин трения.

Теоретическое исследование

При экспериментальном определении величины коэффициента трения в настоящее время широко применяются машины трения типа «Амслер» (ИИ 5018, СМЦ, СМТ и др.).

Основными параметрами, которые регистрируются при трибомониторинге, являются момент трения, сила нагружения образцов, температура, длительность существования сплошной смазочной пленки и др. Современные научные исследования требуют непрерывной модернизации испытательного оборудования с целью получения достоверных экспериментальных данных.

Многочисленными исследователями установлено, что механизм нагружения образцов серийных машин трения работает нестабильно [1], что привело к его модернизации, пружинное нагружение было заменено рычажным.

Для оценки работоспособности самых распространенных рычажных схем нагружения была использована общепринятая характеристика – передаточное отношение [1]

$$u = F_1 / F_H, \quad (1)$$

где F_H – сила, прикладываемая к каретке со стороны механизма нагружения.

Теоретическое исследование позволило установить [1], что (1) представляет собой сумму передаточного отношения u_1 , которое характеризует геометрические параметры механизма нагружения и передаточного отношения u_2 , которое возникает вследствие неуравновешенности рычажного механизма и изменения направления сил.

Изменения u для различных роликовых машин трения могут достигать 40 % при межосевом расстоянии образцов 40...60 мм.

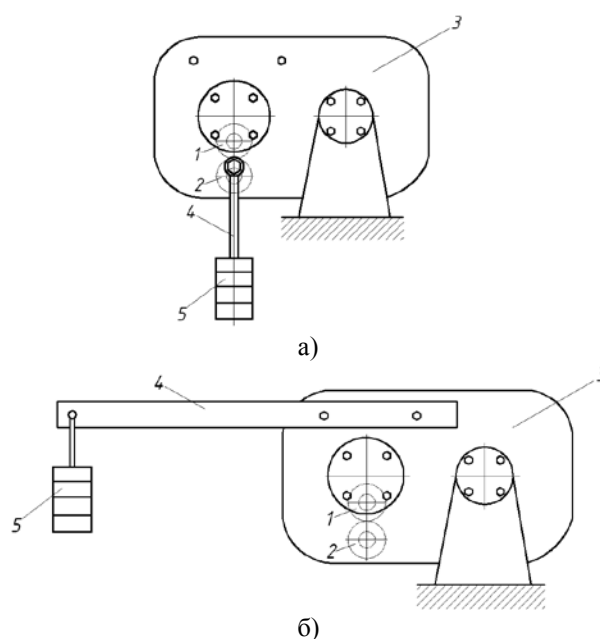


Рис. 1. Рычажные способы нагружения машины трения:
а) при расположении рычага на оси нагружения;
б) с использованием дополнительного рычага, закрепляемого на корпусе каретки; 1, 2 – роликовые образцы; 3 – каретка; 4 – рычаг; 5 – набор грузов

Существенное различие функций передаточных отношений от параметров машин трения потребовало создание обобщенной модели для исследования причин возникновения неуравновешенности и разработки методов ее устранения [2].

Результатом этих исследований является новая конструкция механизма нагружения рычажного типа, в передаточном отношении которой величиной u_2 можно пренебречь ввиду ее малого значения.

Экспериментальные исследования

Механизм нагружения (рис. 2) состоит из оси 1, втулки 2 для крепления на валу, держателя колодки 3, кронштейна 4 для крепления грузов, оси усиления 5, гаек 6, 7.

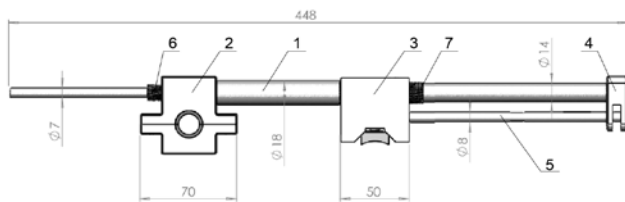


Рис. 2. Механизм нагружения рычажного типа для машины трения ИИ 5018: 1 – ось, 2 – втулка для крепления на валу, 3 – держатель колодки, 4 – кронштейн для крепления грузов, 5 – ось усиления, 6, 7 – гайки.

Для уравнивания разработанной конструкции механизма нагружения использовался противовес (рис. 3), что позволило обеспечить безразличное равновесие рычага [2].

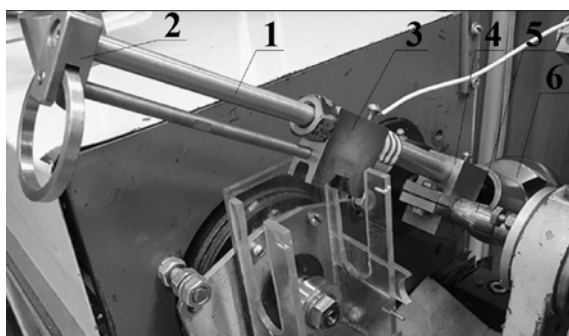


Рис. 3. Механизм нагружения рычажного типа для машины трения ИИ 5018 в исполнении: 1 – ось; 2 – кронштейн для крепления грузов; 3 – держатель колодки; 4 – втулка для крепления на валу; 5 – вал каретки машины трения, 6 – противовес

Корпус держателя колодки выполнен съемным с возможностью фиксации на рычаге в установленном положении и имеет паз для базирования самоустанавливающейся колодки (рис. 4).

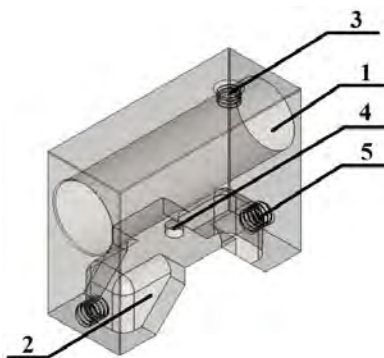


Рис. 4. Держатель колодки: 1 – отверстие для установки на рычаг; 2 – паз для самоустанавливающейся колодки; 3 – отверстие для фиксации держателя на рычаге; 4 – отверстие для установки конуса; 5 – отверстия для пружин

Аттестация механизма нагружения осуществлялась с помощью специального приспособления – динамометрической скобы СД-2 [2], которое обес-

печивает точность измерения усилия сжатия образцов $\pm 2\%$.

Анализ результатов аттестации показал, что механизм нагружения обеспечивает эффективную работу как в условиях малых значений, так и в условиях больших значений F_1 (рис. 5, 6), хорошо коррелируется с ранее полученными значениями [2].

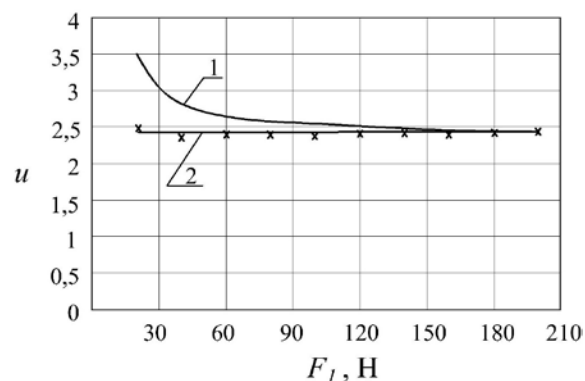


Рис. 5. Изменение передаточного отношения механизма нагружения u от силы сжатия образцов F_1 ($F_1 < 200$ Н): 1 – теоретическое значение; 2 – экспериментальное значение

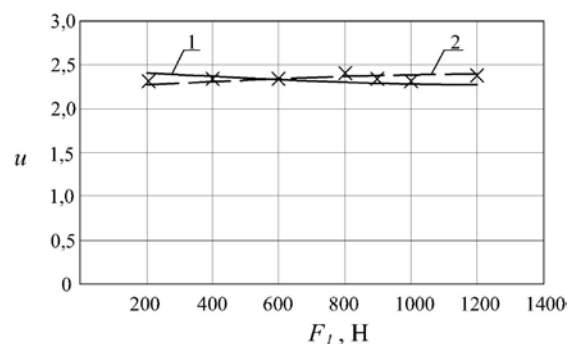


Рис. 6. Изменение передаточного отношения механизма нагружения u от силы, прикладываемой к каретке F_1 ($200 < F_1 < 1200$ Н): 1 – теоретическое значение; 2 – экспериментальное значение

Применение нового механизма нагружения позволило существенно сократить технологическое время на проведение эксперимента по исследованию свойств смазочных материалов, изучить тепловые процессы в парах трения «ролик-колодка» с помощью тепловизора, существенно снизить биение роликовых образцов.

1. Исследование фрикционных свойств высокотяговых масел : монография / Г. В. Даровской, М. А. Буракова, В. Н. университет путей сообщения. – Ростов-на Дону : Ростовский государственный университет путей сообщения, 2017. – 87 с.
2. Елманов, И. М. Особенности градуировки машин трения типа "Амслер" : монография / И. М. Елманов, Г. В. Даровской ; И.М. Елманов, Г.В. Даровской ; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Ростовский государственный университет путей сообщения. – Ростов-на-Дону : Ростовский государственный университет путей сообщения, 2010. – 155 с.

КВАНТОВОХИМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ АДГЕЗИИ ПОКРЫТИЯ ИЗ ТРИКАЛЬЦИЙФОСФАТА К ТИТАНУ

И.Н. Дашевский¹, А.В. Балужева²

¹Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия; dash@ipmnet.ru

²Mathematics Department, University of North Georgia, P.O. Box 1358, Gainesville, Georgia 30503, USA

Для ускорения остеоинтеграции имплантатов на них наносят специальные биоактивные покрытия. Наиболее распространенный материал для имплантатов – титан, один из типичных материалов покрытия – трикальцийфосфат (ТСР). Поскольку в клинике наблюдались случаи отслоения на границе раздела имплантат-покрытие, актуальной проблемой является изучение адгезионной прочности ТСР с титаном. Характеристика этой прочности – энергия связи между титаном и ТСР. Цель работы – определение энергии связи между функциональными группами (анионами), а также полной молекулой ТСР и титаном Ti (II) с помощью методов вычислительной квантовой химии.

Цель

Чтобы минимизировать время остеоинтеграции имплантатов с костью, на имплантаты наносятся специальные биоактивные покрытия [1]. Наиболее распространенным биосовместимым материалом для имплантатов является титан, одним из типичных материалов для покрытия – ортофосфат кальция (трикальцийфосфат, ТСР) $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ (рис. 1).

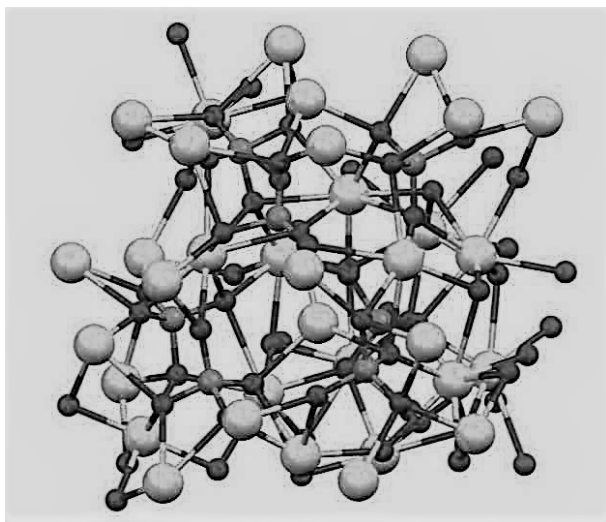


Рис. 1. Трикальцийфосфат (ТСР) $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$

Поскольку в клинике наблюдались случаи отслоения на границе раздела имплантат-покрытие [2], актуальной проблемой является изучение адгезионной прочности покрытия с титаном. Характеристика этой прочности – энергия связи между титаном и ТСР. Целью данной работы было определение энергии связи между функциональными группами (анионами) трикальцийфосфата и титаном Ti (II) [3] с помощью методов вычислительной квантовой химии (расчетный комплекс вычислительной химии Gaussian 09, Rev. C.01 [4]).

Результаты и их обсуждение

Результаты вычисления основных расчетных величин приведены в табл. 1. Как видно из табл. 1, по мере поступления в структуру все новых атомов кислорода электронная плотность у Ti (II) увеличи-

вается гораздо значительнее, чем у заряда атома фосфора. По-видимому, это говорит о том, что наиболее сильным взаимодействием в отношении энергии связи Ti (II) и ТСР является взаимодействие между титаном и кислородом.

Кроме того, по мере роста сложности конструкций более благоприятной становится и геометрия. У $[\text{Ti}(\text{OH})\text{PO}_4]^{2-}$ геометрия квазикресла содержит четырехчленное кольцо с низкими углами связи и высокой энергией. В верхней части структуры рядом с гидроксидом имеется открытое пространство, которое доступно и энергетически выгодно для дополнительных взаимодействий. Именно это, по-видимому, объясняет, почему структура $[\text{Ti}(\text{OH})_2\text{PO}_4]^{3-}$ содержит конечный гидроксид с противоположной стороны от атома титана, поскольку атом титана содержит более положительный заряд, чем любой из двух атомов кислорода в верхней части структуры. Это ближайшее место, на котором гидроксид может связаться с низкоэнергетической частью $[\text{Ti}(\text{OH})_2\text{PO}_4]^{3-}$ (верхнее пространство, которое содержит открытый кислород и гидроксид). Структура $[\text{Ti}(\text{OH})_2\text{PO}_4]^{3-}$ представляет наиболее сложную геометрию, а также самую низкую энергию основного состояния, что в соответствии с теорией функционала плотности предполагает самую высокую энергию связи по сравнению с другими структурами. По мере того, как от структуры к структуре увеличивается электронная плотность титана, увеличивается и прочность связи между титаном и соседними с ним атомами кислорода. Влияние титана с его резким изменением заряда является доминирующим по сравнению с атомом фосфора, заряд которого меняется мало. С усложнением структуры заряд атома титана становится все более отрицательным, что приводит к более центрально отрицательной структуре и меньшей энергии основного состояния. Поскольку орбитальное пространство титана все больше заполняется электронами от соседних атомов кислорода, существует ограниченное число фосфат-ионов, которые могут образовывать связь с титаном. Это говорит о том, что фосфат-титановые (II) взаимодействия могут выступать в качестве ограничительного параметра для этой модели. В биологической и медицинской практике типичным является

рассмотрение вопроса о том, будет ли энергия связывания химических веществ, которые присоединяются к соединениям и тканям человеческого организма, влиять на необходимые биологические

функции организма. Определение точного оптимизационного максимума энергии связи TCP с Ti (II) будет полезно для практических целей, таких как обеспечение того, чтобы сила

Таблица 1. Энергия связывания Ti (II) с составляющими ионами трикальцийфосфата

Molecule	PO ₄	Ca	TiO ₂	TiO ₂ PO ₄	TiO ₂ (PO ₄) ₂	TiO ₂ (PO ₄) ₂ Ca ₃
Picture						
TiO ₂ Bond Length (Å)	N/A	N/A	1.63	1.76 & 1.63	1.85 & 1.60	1.70 & 1.71
TiO ₂ Bond Angle (degrees)	N/A	N/A	107.61	103.95	106.89	114.57
Ground Energy of Structure (a.u.)	-638.2	-674.2	-995.0	-1633.8	-2272.6	-4295.9
Charge of Titanium	N/A	N/A	0.961	1.156	1.188	1.127
Binding Energy (a.u.)	N/A	N/A	N/A	0.59	0.54	0.62

сцепления TCP и Ti (II) не влияла на естественный процесс заживления.

Выводы

Полученные в работе расчетные оценки как энергии связи Ti (II) с фрагментами TCP, так и прочности адгезии разумны и сопоставимы со значениями, полученными в эксперименте [5] и расчетах с использованием других пакетов квантовой химии [6, 7].

По-видимому, наиболее значимым фактором, определяющим прочность связи Ti (II) с фосфатами кальция, является количество атомов кислорода в образующемся соединении и их взаимодействие с атомом титана. При этом с увеличением числа атомов кислорода происходит параллельное увеличение электронной плотности вокруг атома Ti (II), характерных частот межатомных связей, прочности сцепления, а также формирование более благоприятных геометрических формы полученных соединений. Выявленная закономерность может быть полезна при регулировании прочности сцепления покрытия с подложкой.

В целом квантово-химическое моделирование представляется полезным и эффективным методом оценки прочности связи между подложкой и покрытием, который имеет преимущество универсальности и позволяет существенно сократить объем, стоимость и трудозатраты, связанные с проведением физических экспериментов.

Исследование проводилось по теме государственного задания (№ госрегистрации

AAAA-A17-117021310386-3) и при частичной поддержке грантов РФФИ №17-08-01579 и №17-08-01312 совместно с P. Todebush и W. Kwiatkowski. В работе использовалась среда Extreme Science and Engineering Discovery Environment (XSEDE) при поддержке гранта Национального научного фонда №ACI-1548562.

1. Civantos A., Martínez-Campos E., Ramos V., et al. Titanium Coatings and Surface Modifications: Toward Clinically Useful Bioactive Implants // ACS Biomater. Sci. Eng. 2017. V.3. № 7. P. 1245–1261.
2. Roy M., Bandyopadhyay A., Bose S., Induction Plasma Sprayed Nano Hydroxyapatite Coatings on Titanium for Orthopaedic and Dental Implants // Surface & coatings technology. 2011. V.205. № 8-9. P. 2785-2792.
3. Dashevskiy I., Balueva A., Todebush P., et al. On Estimation of Adhesive Strength of Implants Bioactive Coating with Titanium by Density Functional Theory and Molecular Dynamics Simulations // Materials Research. 2019. V.22. № 3, e20190030. <https://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2019-0030>
4. Gaussian <http://www.gaussian.com/>
5. Fadeeva I.V., Kalita V.I., Komlev D.I., Radiuk A.A., Fomin A.S., Davidova G.A., Fursova N.K., et al. (2020). In Vitro Properties of Manganese-Substituted Tricalcium Phosphate Coatings for Titanium Biomedical Implants Deposited by Arc Plasma. Materials, V.13 (19), 4411.
6. Grubova, I. Y., Surmeneva, M. A., Huygh, S., Surmenev, R. A., & Neyts, E. C. Density Functional Theory Study of Interface Interactions in Hydroxyapatite/Rutile Composites for Biomedical Applications. The Journal of Physical Chemistry C, (2017). V.121 (29), 15687-15695.
7. Грубова И.Ю. Механизмы межатомного взаимодействия на границе раздела титан-кальций-фосфатное покрытие: первопринципное исследование. Дис. к.ф.-м.н. – Томск: 2018. – 251 с.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ГРУППОВОЙ ПНЕВМОПРИВОД ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ РЕВОЛЬВЕРНОЙ ГОЛОВКИ СТАНКА

Г.А. Долгов, В.С. Сидоренко, Д.А. Коротыч, С.П. Приходько

Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия; grigorydolgov@yandex.ru

В работе предлагается автоматизированный групповой пневмопривод исполнительных движений РГ с изменяемой «на ходу» структурой обеспечивающий совместную последовательную или параллельную работу приводов разжима, поворота, зажима и фиксации РГ [1,4-5].

Основная часть

Эффективность металлообработки оценивается системными показателями, среди которых производительность является определяющим реализуемыми станочными системами (СС).

Производительность металлообрабатывающего оборудования (МОО) определяется выражением:

$$П = \frac{1}{T_{шт}} \quad (1)$$

где: $T_{шт}$ - штучное время обработки;

Основными составляющими штучного времени являются машинное $T_{маш}$ и вспомогательное $T_{вспом}$ времена.

$$T_{вспом} = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 \quad (2)$$

$T_{вспом}$ определяется суммарным временем: затрачиваемым на загрузку или выгрузку T_1 , смену заготовки инструмента T_2 , переключением управлений цикла T_3 ; контроля параметров обработки T_4 ; переключением управлений рабочим циклом револьверной головки T_5 ; управлением приводами целевых механизмов. Контроль параметров форм образуемых поверхностей достигает 30% перспективным направлением повышения эффективности металлообработки.

Решение задачи в создании новых и совершенствовании действующих систем приводов исполнительных движений целевых механизмов СС, обеспечивающих технологию обработки.

Многоинструментальные целевые механизмы, СС частности, револьверные головки (РГ), оснащенные быстроходными системами автоматизированных приводов успешно решают обсуждаемую проблему [2].

Анализ составляющих выражения 2 позволяет выделить T_2 при многооперационной обработке с одной установки заготовки. РГ успешно решают такую задачу, однако суммарное время смены позиций РГ после выполнения всех операций достигает значительных величин, что заметно снижает производительность. В этих условиях создание быстроходных, групповых приводов, обеспечивающих поворот, зажим и фиксацию РГ является актуальным инновационным решением.

$$T_{сми} = T_{уст} + T_{pz} + T_w + T_{зж} + T_{фк} + T_{пу}, \quad (3)$$

где $T_{сми}$ - время смены инструмента; $T_{уст}$ - время отвода и подвода РГ при смене позиции инструмента; T_{pz} - время разжима; T_w - время поворота РГ в следующую позицию; $T_{зж}$ - время зажима и точного углового позиционирования РГ после поворота; $T_{фк}$ - время фиксации план – шайбы РГ; $T_{пу}$ - время переключения управлений элементами цикла смены инструмента РГ.

Анализ типовых рабочих циклов применяемых РГ позволяет выделить основные составляющие выражения (3) определяющие длительность смены позиции РГ ($T_{pz}, T_w, \sum T_{пу}$) и предложить решение сокращающие длительность $T_{сми}$.

В работе предлагается быстроходный пневмомеханический привод обеспечивающий угловое позиционирование разжим, поворот, зажим и фиксацию план-шайбы РГ в заданную позицию при каждой смене инструмента.

Принципиальная пневмокинематическая схема привода РГ представлена на рисунке 1.

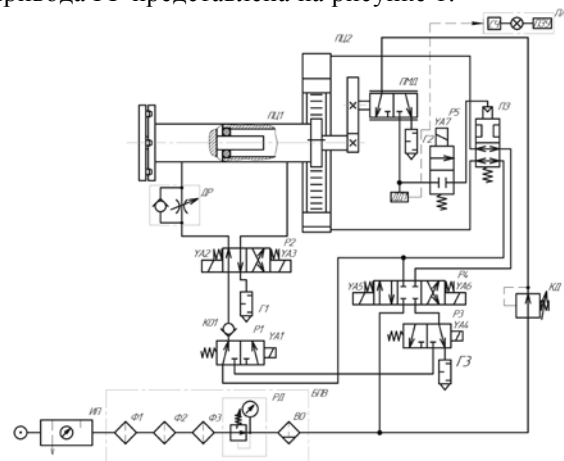


Рис 1. Принципиальная пневмокинематическая схема: ПЦ1 – пневматический цилиндр разжима – зажима план – шайбы; ПЦ2 – поворотный пневматический цилиндр план-шайбы; ПЗ – пневматический замок; Р1 – Р6 – пневмомеханические датчики; ПМД – пневмомеханический датчик; Г1-Г3 – глушители; ДД1 – датчик давления; ДР – дроссель; УА1 – УА7 – электромагниты; ПЛК – программируемый логический контроллер; БПВ – блок подготовки воздуха, КО1 – клапан обратный; КР – клапан редукционный, Ф1 – Ф3 – фильтр, ВО – влагоотделитель, РД – реле давления.

Управляемая пневмомеханическая динамическая система, действующая на практике, реализуются, как правило последовательными моноцикловыми схемами, многими переключениями управлений, элементами рабочих циклов. При достаточной структурной и параметрической определенности известных расчетов повышений возникают реальные ограничения быстроходности управляемых целевых механизмов. Так внедрением изменяемых «на ходу» структур, обеспечивающих алгоритмы совместной или раздельной секционной работы привод реализующий указанные ограничения по технологии групповых систем приводов. [3] При этом удается сокращать длительность цикла смены инструмента в РГ улучшать энергетику таких систем.

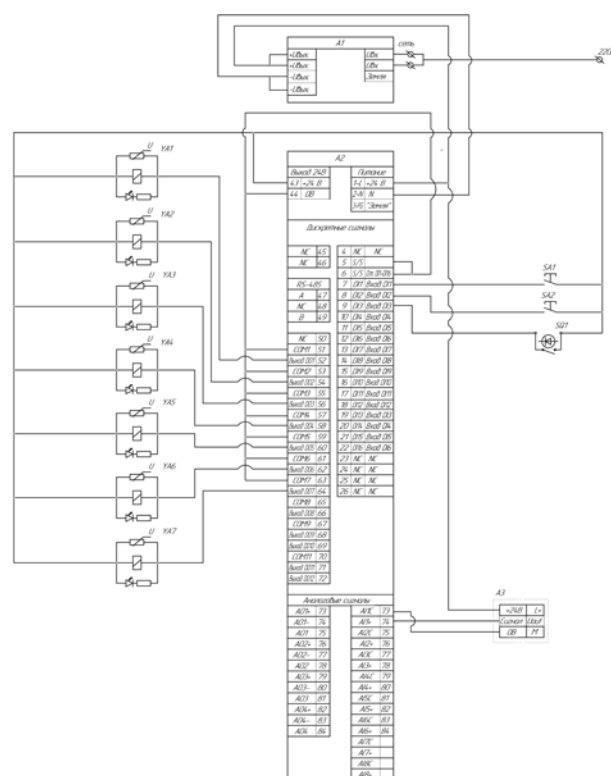
Описание работы

Работа группового привода осуществляется следующим образом:

Информационный сигнал поступающий через датчик на программируемый логический контроллер (ПЛК). ПЛК является цифровой информационной машиной, поэтому он задает координату поворота пневмоцилиндра ПЦ2 в градусах. Сжатый воздух от блока подготовки (БПВ) подается через распределитель Р4 при включенном электромагните УА5, в привод разжима/зажима ПЦ1. Усилие зажима определяется регулятором давления РД. Одновременно с этим, сжатый воздух через распределитель Р4 при включенном электромагните УА5, подается через замок ПЗ, при открытом положении на пневмоцилиндр ПЦ2 поворотного действия. Первым при меньшей нагрузке, движение начнет ПЦ1 разжима, а ПЦ2 поворота «готовится» к разгону повышением давления в напорной полости. Далее пневмоцилиндр ПЦ2 начнет движение и произойдет вращение план - шайбы. Через повышающую механическую зубчатую передачу приводится в движение ПМД. ПМД кинематически связанный с вращением план - шайбы осуществляет измерение углового перемещения [6], преобразуя его в маломощный электрический сигнал поступающий в ПЛК. На предпоследнем совпадении сигналов в ПЛК, контроллер подает сигнал на переключение распределителя (логического элемента «ИЛИ») Р3, включения электромагнита УА7, далее подает сигнал на переключение распределителя (логического элемента «ИЛИ») Р1, включения электромагнита УА1, таким образом выхлопная полость пневмоцилиндра ПЦ2, подключается в напорную линию пневмоцилиндра ПЦ1, тем самым обеспечивая последовательную работу привода поворота, зажима и замедления скорости вращения план - шайбы. ПЛК подает сигнал для переключения распределителя Р2, отключения электромагнита УА2 и включения электромагнита УА3, для зажи-

ма детали. Зажим регулируется дросселем ДР. На предпоследнем совпадении контроллер «готовит» сигнал для питания на электромагнит УА7, тем самым включить распределитель Р5. Пневмоцилиндр ПЦ2 переходит на режим замедления и уменьшения скорости поворота. На последнем совпадении датчик давления ДД подает сигнал на ПЛК для прекращения поворота пневмоцилиндра ПЦ2. Распределитель Р5 подает пневматический сигнал на замок ПЗ, для фиксации пневмоцилиндра ПЦ2.

На рисунке 2 представлена автоматизированная система управления состоящая, из А1 - блока управления Siemens PM1507, А2 - контроллера Siemens Simatic S7 – 1200, А3 - магнитного датчика положения MPS – 128TSTPO, SA1 – SA2 - кнопки включения и выключения, SQ1 – датчика давления SWCN – P10 – P3 – 2, YA1 – YA7 – электромагнитов.



АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЦИФРОВЫХ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

М.Н. Ерофеев, И.Н. Кравченко, Д.М. Бодунов

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

В рамках реализации Указов Президента РФ № 603 от 7.05.2012, № 642 от 01.12.2016 «О Стратегии научно-технологического развития РФ» и № 474 от 21.07.2020 «О национальных целях развития РФ на период до 2030 г.» и № 127-ФЗ «О науке и государственной научно-технической политике», для развития интеллектуального потенциала страны, сквозной поддержки исследований и разработок на разных этапах уровней готовности технологий и обеспечения перехода к последующим стадиям инновационного цикла и повышения эффективности ресурсного обеспечения научно-технологической сферы (инфраструктуры, материально-технического обеспечения и т.п.) по созданию и совершенствованию конструкций и технологий изготовления изделий ракетно-космического, авиационного, транспортного и специального машиностроения. Поэтому, актуальной задачей для развития Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН является создание новых научных подразделений, а также реорганизация существующих лабораторий, отвечающих современным задачам страны и актуальным вызовам времени.

Лаборатория цифровых методов управления жизненным циклом изделий машиностроения, созданная по решению Ученого совета ИМАШ РАН, является научным структурным подразделением Института, входящим в состав отдела «Трение, износ, смазка. Трибология» и занимающимся тематикой, определяемой планами отдела и Института.

Основным направлением научной деятельности лаборатории является:

- разработка научных основ создания новых машин, совершенствования конструкций и технологий изготовления изделий ракетно-космического, авиационного, транспортного и специального машиностроения;
- развитие фундаментальных научных исследований в различных областях машиностроения, совершенствование современных аналитических и вычислительных методов исследования математических моделей процессов и состояний;
- обеспечение работоспособности на всех этапах жизненного цикла на основе цифрового проектирования, компьютерного моделирования и конструирования, агрегатов, узлов, изделий и конструкций с применением САПР;
- разработка новых методов и средств испытаний конструктивных элементов, узлов, агрегатов,

машин и оборудования в различных (в т.ч. экстремальных) условиях эксплуатации;

- разработка программного обеспечения (модулей, программ и баз данных для ЭВМ) для автоматизации процессов управления техническим состоянием и создания цифровых портретов (двойников) изделий машиностроения;
- проведение фундаментальных, прогнознописковых и прикладных исследований в области создания методов и средств обеспечения функционального и информационного взаимодействия в системах «оператор-машина», а также разработка базовых принципов и технологии человеко-компьютерного взаимодействия за счет внедрения телеметрических систем, структурный синтез телеметрических систем для изделий ракетно-космического, авиационного, транспортного и специального машиностроения
- разработка теоретических основ, методов (способов) и алгоритмов диагностирования, прогнозирования и определение динамики изменения параметров технического состояния изделий в различных условиях эксплуатации и применения;
- обоснование режимов эксплуатации и ресурса (сроков применения) изделий, мероприятий и технологий восстановления работоспособности изделий машиностроения, обоснование стратегий и способов утилизации, переработки изделий и рециклинга материалов для управления их техническим состоянием на всех этапах жизненного цикла изделий.

Для управления техническим состоянием изделий машиностроения в настоящее время используется ряд принципов. К ним относятся: управление по ресурсу, управление по уровню надёжности, управление по состоянию [1].

Принципы управления техническим состоянием по ресурсу и по состоянию предполагают прекращение технической эксплуатации изделия до появления отказа с некоторой вероятностью. Характеристикой предотказного состояния при эксплуатации по ресурсу является ресурс изделия (технический, межрегламентный, межремонтный). Изделие эксплуатируется до выработки определённого ресурса. По истечении технического (межремонтного) ресурса в целях профилактики и исключения аварийных ситуаций проводится контроль и техническое обслуживание изделий. Их периодичность определяется значением межрегламентного ресурса.

При управлении по состоянию ресурс для изделия не устанавливается. Характеристикой предотказного состояния являются значения параметров технического состояния изделия [2]. Изделие эксплуатируется до тех пор, пока его параметры находятся в пределах установленных допусков. В случае выхода одного или нескольких параметров за пределы допусков на изделиях выполняется техническое обслуживание, либо профилактический ремонт. Важнейшим элементом эксплуатации по состоянию является контроль, с помощью которого осуществляется наблюдение за техническим состоянием изделий, его оценка и прогнозирование [3].

Управление по уровню надёжности также не предусматривает установления для изделия какого-либо ресурса. Изделие эксплуатируется до тех пор, пока интенсивность (частота) отказов не превысит установленный уровень.

Таким образом, критерием предотказного состояния здесь является значение интенсивности (частоты) отказов заданного уровня производится техническое обслуживание или профилактический ремонт изделий, либо изделие полностью снимается с эксплуатации [4].

В практике эксплуатации изделий машиностроения в той или иной степени применяются все три принципа управления. Их применение во многом определяется уровнем технического совершенства объектов эксплуатации (надёжностью, эксплуатационной технологичностью, контролепригодностью) и уровнем информационного и технологического обеспечения системы управления техническим состоянием [2, 4].

Реализация адаптивных программ управления возможна при наличии в системе технической эксплуатации изделий соответствующих программно-математических и аппаратных средств управления их техническим состоянием [5].

Применительно к производственному технологическому оборудованию наиболее подходит адаптивная система с настраиваемой моделью. В этой системе основную функцию выполняет математическая модель многорежимной эксплуатации оборудования, которая настраивается (корректируется) в процессе эксплуатации [6].

Таким образом, в настоящее время актуальными являются следующие направления исследований теории эксплуатации, имеющие теоретическое и прикладное значение:

- исследование технических устройств как объектов эксплуатации, выявление и описание их свойств;
- изучение закономерностей создания и функционирования системы эксплуатации, обоснование номенклатуры ее свойств, задание требований к характеристикам этих свойств;
- изучение влияния процесса эксплуатации технических устройств на окружающую среду и обоснование способов снижения вредного влияния на нее;
- изучение закономерностей изменения состояния технических устройств в процессе эксплуатации и обоснование методов управления ими;
- изучение закономерностей управления эксплуатацией технических устройств, разработка систем поддержки принятия решений, направленных на рациональное использование объекта эксплуатации в различных условиях.

1. Ерофеев М.Н. Интегрированная система управления инфраструктурой – действенный инструмент повышения эффективности, надежности и безопасности предприятий // Научные труды Международной молодежной научной конференции XXXVII Гагаринские чтения. – М.: Издательский центр МАТИ, 2011. – С. 163-164.
2. Кравченко И.Н., Ерофеев М.Н., Москаль О.Я., Марковчин С.Г., Герасимов Д.В. Формирование комплектов средств метрологического обеспечения с учетом критерия приспособленности технологического оборудования к диагностированию // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2012. – № 12. – С. 18-27.
3. Управление техническим состоянием динамических систем / А.И. Буравлев, Б.И. Доценко, И.Е. Казаков; Под общ. ред. И.Е. Казакова. – М.: Машиностроение, 1995. – 240 с.
4. Ерофеев М.Н. Управление техническим состоянием, повышение надежности и эффективности эксплуатации автомобильной и специальной техники. // Материалы II Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники» Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского. Санкт-Петербург, 2014. – С. 33-35.
5. Ларин П.Г., Ерофеев М.Н. Применение автоматизированных систем управления технической эксплуатацией автомобильной и специальной техники // Научно-технический сборник: По результатам XXIV Международной научно-практической конференции «Предупреждение. Спасение. Помощь». Изд-во Академии гражданской защиты, Химки: 2014. – С. 154-160.
6. Кравченко И.Н., Чеха Т.А., Бумарсков Д.А., Ерофеев М.Н. Анализ структур и методов управления техническим состоянием технологического оборудования бетонорастворных комплексов // Строительные и дорожные машины. - 2017. - №2. – С. 27-33.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ПОДБОР ДИСПЕРСНО-НАПОЛНЕННОГО КОМПОЗИТА С ЦЕЛЮ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛИ ПУТЕМ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ

С.Ю. Жачкин^{1,2}, Г.И. Трифонов¹, Л.А. Кукарских¹

¹Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, Россия; trifonov_gi@mail.ru

²Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

В данной работе проведено исследование по вопросу оптимального подбора материала для плазменного напыления детали с учетом её эксплуатационных особенностей и видов износа рабочих поверхностей. В частности, проанализированы условия эксплуатации шнека транспортирующего конвейера. Рассмотрены технологические особенности нанесения композитных материалов технологией плазменного напыления. Произведен теоретический подбор двухфазного дисперсно-наполненного композита для нанесения на рабочие поверхности шнека с целью их восстановления и упрочнения.

Введение

Все большую актуальность в области ремонта и восстановления машин и механизмов приобретают газотермические методы нанесения функциональных покрытий на рабочие поверхности деталей машинных узлов.

Назначение газотермических методов нанесения покрытий заключается в обеспечении и получении специальных физико-механических свойств поверхности детали, а также в восстановлении изношенных узлов и механизмов после их долгосрочной и интенсивной эксплуатации. Одной из главных причин активного применения газотермических методов нанесения покрытий в области машиностроения и сельского хозяйства является экономия финансовых средств ввиду низкого расхода дефицитных материалов на производствах. В частности, эффективным способом газотермической обработки поверхности детали, обеспечивающим выше указанные преимущества, является плазменное напыление функциональных материалов.

При плазменном напылении особой популярностью пользуются композитные материалы ввиду достижения заданных физико-механических свойств обрабатываемой поверхности детали за счет свойств композитного порошка, а также из-за влияния на процесс формирования покрытия газов (транспортирующего и плазмообразующего), поскольку механические, теплофизические и оптические свойства композитных материалов в основном зависят от сочетания их микроструктуры и параметров кристаллической решетки, формируемой при нанесении покрытия [1].

В настоящее время отсутствует единая теоретически и практически обоснованная концепция, позволяющая спроектировать оптимальный технологический процесс плазменного напыления ввиду многофакторности технологии и сложности подбора материала напыления. Подбор напыляемого материала и специальных параметров напыления происходит после предварительного проведения набора технологических экспериментов с последующим исследованием характеристик нанесенных покрытий,

таких как структура, пористость, толщина покрытия, адгезия покрытия с подложкой, когезия и остаточные напряжения нанесенного покрытия.

Цель работы

Провести исследование вопроса по оптимальному подбору композитного материала покрытия, учитывая технологические особенности процесса плазменного напыления, а также условия эксплуатации рабочих поверхностей детали.

Материалы и методы

В качестве исследуемой детали-представителя для нанесения композитного покрытия плазменным напылением был выбран шнек транспортирующего конвейера. Для обоснования целесообразности нанесения функционального покрытия на рабочую поверхность шнека была проведена оценка износостойкости материала, из которого он состоит – Ст20Х (табл. 1), при активной его эксплуатации [2].

Таблица 1. Химический состав Ст20Х

Массовая доля элемента, %	
Углерод (C)	0,17–0,23
Кремний (Si)	0,17–0,37
Марганец (Mn)	0,5–0,8
Никель (Ni)	до 0,3
Сера (S)	до 0,035
Фосфор (P)	до 0,035
Хром (Cr)	0,7–1,0
Медь (Cu)	до 0,3

В работе авторов [3] было рассмотрено силовое воздействие на абразивную частицу при ее перемещении по шнеку, проведена аналитическая оценка износостойкости его рабочих поверхностей в условиях активного абразивного изнашивания.

В итоге были смоделированы уравнения по определению интенсивности изнашивания при упругом и пластическом контакте, при усталостном разрушении и при микрорезании. Вследствие полученных результатов проведенного анализа был сделан вывод, что ввиду активной эксплуатации и абразивного износа рабочей поверхности шнека, транспортирующий конвейер весьма быстро выходит из строя, следовательно, необходим плановый и вне-

плановой ремонт (замена) либо восстановление рабочих поверхностей шнека. Ввиду того, что замена любой детали механизма, даже плановая, требует больших финансовых ресурсов, то рациональнее и экономичнее производить восстановление её рабочих поверхностей.

Подбор и анализ материала покрытия

Как показывает практика [4], различная грануляция компонентов, входящих в порошковые смеси, не гарантирует равномерного их распределения в легированном покрытии, что может привести к повышению степени возникновения остаточных напряжений в покрытии, а также к снижению стойкости к абразивному износу и ударным нагрузкам. С целью устранения указанных недостатков было принято решение произвести подбор оптимального состава композитного материала для его нанесения плазменным напылением на поверхности шнека.

Результаты исследований [5] показали, что наибольшую стойкость к абразивному износу имеет покрытие на основе порошковой смеси ПГ-СР3 и ПГ-СР4 (NiCrBSiFe), с добавлением наполнителя – карбида титана (TiC).

Карбид титана относится к группе синтетических, сверхтвёрдых, тугоплавких, жаропрочных материалов и достаточно востребован в процессах газотермического напыления покрытий, таких как плазменное напыление [6]. Преимущества TiC, которые позволяют протекать процессу плазменного напыления без критических отклонений от технического задания, заключаются в его способности выдерживать резкие температурные перепады, высокой прочности и жаропрочности, малой скорости испарения, высокой стойкости к абразивному износу и к агрессивным средам эксплуатации.

Стоит отметить, что применение лишь TiC для нанесения на поверхность детали плазменным напылением обусловлено высокой пористостью, что негативно сказывается на качестве формируемого покрытия, в частности на когезии нанесённых слоёв. Для решения данной проблемы авторами работы был подобран матричный материал композита – многокомпонентный порошок из самофлюсующихся сплавов NiCrBSiFe (ПГ-СР3 / ПГ-СР4) состав которого отражен в таб. 2 [7].

Таблица 2. Химический состав самофлюсующегося сплава ПГ-СР3

Массовая доля элемента, %	
Никель (Ni)	основа
Углерод (C)	0,4–0,7
Хром (Cr)	13,5–16,5
Кремний (Si)	2,5–3,5
Марганец (Mn)	2,5
Вольфрам (W)	0,2–0,4
Молибден (Mo)	0,08–0,15
Бор (B)	2,0–2,8
Железо (Fe))	5,0

В практике самофлюсующийся порошок NiCrBSiFe наносят на узлы и детали машин всеми известными способами наплавки и напыления, при этом формируемые легированные покрытия обеспечивают высокую стойкость к износу с коррозионной стойкостью, и позволяют эксплуатировать детали в условиях ударных нагрузок, в агрессивных средах с абразивным износом при температурах до 600 градусов [7]. Внедрение в состав порошка самофлюсующихся сплавов NiCrBSiFe доли TiC теоретически должно уменьшить интенсивность абразивного изнашивания детали, и концентрацию напряжений на поверхности трения, повысить твердость покрытия. Данные преимущества полностью отвечают существующим требованиям к износостойкому покрытию.

Добавление наполнителя производится в большинстве случаев механическим смешиванием [5, 7]. Механическое смешивание порошка матричного типа, роль которого выполняет порошок самофлюсующихся сплавов, с порошком упрочняющих фаз TiC должно обеспечить лучшие результаты, чем замешивание упрочняющего порошка в расплав матрицы. При объемной доле упрочняющей фазы (наполнителя) менее 5 % добиться равномерного распределения в матричном порошке не удастся [8]. Опираясь на результаты проведенных исследований, объемная доля наполнителя в матрице композитного порошка, для достижения необходимых физико-механических свойств формируемого покрытия, должна находиться в диапазоне 10-20 %. Следовательно, получаем дисперсно-наполненный композит типа NiCrBSiFe с 10-20% упрочняющих частиц наполнителя TiC.

Внутренняя макроструктура сформированного дисперсно-наполненного композита, как и прочих существующих композитных материалов, будет стохастической, при этом в процессе формирования покрытия случайными становятся форма, размеры и свойства мелкодисперсной фазы, так и их локализация в основной матрице [8, 9].

Сложность теоретического описания и прогнозирования, например, процесса возникновения остаточных напряжений в композитных покрытиях, заключается не только в учете количества формируемых слоёв материала, но и в учете обоюдного влияния основной матрицы и наполнителя. Так, при введении в основную матрицу наполнителя возможно возникновения агломератов (рис. 1А), что значительно снижает адгезию и когезию покрытия [10]. Чтобы этого избежать, необходимо чтобы частицы матричного материала с вкраплениями наполнителя подвергались спеканию и деформированию в плазменной струе практически одновременно, тогда можно будет избежать агломерации наполнителя (рис. 1Б).

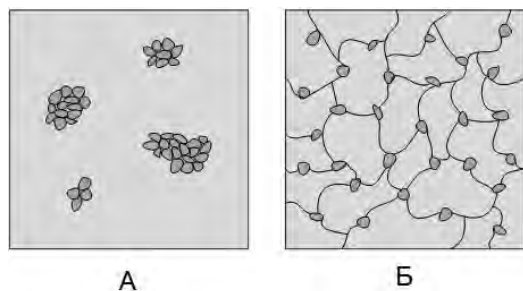


Рис. 1. Теоретическое распределение частиц в дисперсно-упрочненном композите:

А – агломерация наполнителя при введении в расплавленную матрицу, Б – формируемое покрытие при спекании и деформировании дисперсно-упрочненного композита

Выводы

Проведен анализ условий эксплуатации шнека транспортирующего конвейера. Исследован вопрос нанесения композитных материалов технологией плазменного напыления.

С учетом проведенных исследований и анализа теоретических аспектов формирования дисперсно-упрочненного композита, подобраны диапазоны процентного содержания элементов двухфазного композитного материала для нанесения на рабочие поверхности (винтовую и цилиндрическую) шнека – матричная фаза: 80-90% NiCrBSiFe, упрочняющая фаза: 10-20% частицы TiC.

1. Борисов Ю.С., Харламов Ю.А., Сидоренко С.Л. и др. Газотермические покрытия из порошковых материалов. Справочник. Киев: Наукова думка, 1987. 544 с.

2. Шишков М.М. Марочник сталей и сплавов: справочник. Изд. 3-е, дополненное. Донецк, 2000. 456 с.
3. Жачкин С.Ю., Пухов Е.В., Трифонов Г.И., Комаров Я.В., Загоруйко К.В. Анализ износостойкости функционального покрытия в условиях абразивного изнашивания сложно-профильной детали трения. Вестник воронежского государственного аграрного университета. Процессы и машины агроинженерных систем. Вып.3 (62). Т.12. 2019. С. 32–40.
4. Ловшенко Ф.Г., Ловшенко Г.Ф. Композиционные наноструктурные механически легированные порошки для газотермических покрытий: монография. Могилев: Белорус. Рос. ун-т, 2013. 215 с.
5. Жачкин С.Ю., Трифонов Г.И., Пеньков Н.А. Применение технологии плазменного напыления для повышения эксплуатационной надежности сельхозмашин. Журнал «Наука в Центральной России. ФГБНУ ВНИИТИН. №4 (28). 2017. С. 131–136.
6. Кипарисов, С.С., Петров А.П. Карбид титана: получение, свойства, применение. Производственное издание М.: Металлургия, 1987. 216 с.
7. Павлов, Е.В., Кобелев Н.С., Павлов И.В. Материалы, применяемые для создания комбинированных покрытий с различными свойствами. Качество продукции: контроль, управление, повышение, планирование: сборник научных трудов 5-й Международной молодежной научно-практической конференции, Курск, 14 ноября 2018 года. Курск: Закрытое акционерное общество «Университетская книга», 2018. С. 118–124.
8. Аннин Б.Д., Карпов Е.В. Механика композитов: учебное пособие для вузов. 2-е изд. Москва: Издательство «Юрайт», Новосибирск: РИЦ НГУ, 2021. 85 с.
9. Бобров Г.В., Ильин А.А. Нанесение неорганических покрытий (теория, технология, оборудование): Учебное пособие для студентов вузов. М.: Интермет Инжиниринг, 2004. 624 с.
10. Барвинок В.А. Управление напряженным состоянием и свойства плазменных покрытий. М.: Машиностроение, 1990. 384 с.

О ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВАХ ОЦЕНКИ БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРОТЯЖЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ В РАЗЛИЧНЫХ ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Э.Б. Завойчинская

МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; elen@evlogos.com

Представляется метод оценки долговечности и остаточного ресурса участка трубопровода при переменном эксплуатационном нагружении и коррозионных и стресскоррозионных воздействиях. В качестве распределения вероятности разрушения участка рассматривается распределение Пуассона, долговечность участка находится по теории предельных процессов нагружения, теории усталостного масштабного-структурного разрушения и известным методам механики разрушения, базовые функции определяются с учетом вида и агрессивности окружающей среды, распределения защитного потенциала и пассивной защищенности (работы защитных покрытий, изоляции, искусственной среды и др.) участка.

Участки продуктопроводов состоят из большого числа конструктивных элементов, находящихся под переменным внутренним давлением перекачиваемого продукта, действием изгибающих и крутильной компонент вектор - момента, продольной и перерезывающих компонент вектор — усилия в поперечных сечениях и температурного поля. Кроме этого, вследствие большой протяженности участки трубопроводов находятся под действием различных природно-климатических и техногенных воздействий вероятностного характера, и возникает задача определения долговечности при эксплуатационном нагружении с учетом воздействий. В процессе эксплуатации возможны экстремальные ситуации в результате изменения этих воздействий, порождающие непроектные предельные напряженно-деформированные состояния. Кроме того, существует проблема больших сроков эксплуатации, например, в настоящее время около 53% магистральных газопроводов эксплуатируется более 30 лет, и возникает проблема определения остаточного ресурса [1-4]. Нормативными документами выделяются следующие виды возможных разрушений: механическое повреждение от деятельности третьих лиц (акты вандализма, механические воздействия землеройной и транспортной техники, взрывы, удары и т.п.), повреждение от техногенных воздействий (при разрушении соседних газонефтепроводов, химических объектов, гидроузлов атомных станций и т.п.), повреждение от аэрогидродинамических и геодинамических воздействий (нарушения почв, природные оползни и др.), повреждение от сейсмических воздействий [5].

С увеличением сроков эксплуатации актуальной становится проблема учета следующих видов электрохимических коррозионных воздействий, в особенности, для участков подземных и морских продуктопроводов [6,7]:

- (1) почвенной коррозии,
- (2) коррозионной активности перекачиваемого продукта,
- (3) коррозии от электромагнитных воздействий блуждающими токами от источников постоянного и переменного токов в зоне «стекания»

блуждающих токов с поверхности трубопровода и (4) биологической коррозии, вызванной жизнедеятельностью микроорганизмов почвы и поверхностных вод (бактериальной и микологической) и др.,

которые проявляются при условии $i_{c.p.} < i_0$, $i_{c.p.}$ — плотность тока катодной защиты, i_0 — плотность предельного диффузионного тока по кислороду. Возникающие в результате этих воздействий дефекты классифицируются на следующие виды:

— коррозия пятнами (мейза-коррозия), образующаяся под отслоившейся изоляцией и при сквозных дефектах изоляции, при $d > t$ ($d = d(\tau)$ — средняя длина проекции дефекта на продольную ось участка, $t = t(\tau)$ — глубина дефекта по толщине участка δ), в т.ч. сплошная равномерная или неравномерная коррозия, характерная для почвенной коррозии и электрокоррозии;

— язвенная коррозия при $d \leq t$ (глубокие каверны), вызывающая разрушение по толщине стенки в виде свищей, характерное для углеродистых сталей магистральных трубопроводов в грунтах, вспучивание и расслоение;

— питтинг при $d \leq t$, характерный для биологической коррозии.

При одновременном воздействии эксплуатационного нагружения (максимальное окружное напряжение до 0.4 предела текучести материала) и коррозионной среды и условия $i_{c.p.} \geq 10i_0$ может иметь место стресс-коррозия (особенно, в областях сварных соединений с очагами в местах скопления неметаллических включений), которая ведет к образованию коррозионно-механических микро- и макротрещин вследствие анодного растворения металла и диффузионного проникновения положительно заряженных ионов водорода в объем материала. Стресс-коррозия относится к наиболее опасным видам разрушений последних лет [4].

Сформулируем критерий безопасности эксплуатации конструкции при переменном нагружении участка и возможных коррозионных разрушениях описанных видов.

Определение долговечности конструкции решается в вероятностной постановке: вводится функция распределения вероятности разрушения конструкции $Q = Q(\tau)$, $0 \leq Q \leq 1$, в момент времени τ , $\tau \in [0, t]$; предлагаются выражения для $Q = Q(\tau)$ через распределения вероятности разрушения k -тых участков от коррозионных воздействий $Q_{k,j} = Q_{k,j}(\tau)$, $j = 1, \dots, 5$, $k = 1, \dots, K$ [5,8]:

$$Q(\tau) = \sum_{k=1}^K \frac{Q_k(\tau)}{1 - Q_k(\tau)} \prod_{k=1}^K (1 - Q_k(\tau)),$$

$$Q_k(\tau) = \sum_{j=1}^5 \frac{Q_{k,j}(\tau)}{1 - Q_{k,j}(\tau)} \prod_{j=1}^5 (1 - Q_{k,j}(\tau))$$

При эксплуатационном нагружении в качестве функции распределения вероятности разрушения $Q_{k,j} = Q_{k,j}(\tau)$, $j = 1, \dots, 4$, выбирается распределение Пуассона (по первому разрушению) в таком виде [9]:

$$Q_{k,j}(\tau) = \varphi_{k,j}(\tau) e^{1 - \varphi_{k,j}(\tau)}, \quad \varphi_{k,j}(\tau) = \lambda_j l_k \frac{\tilde{t}}{t_{f,k,j}(v_{k,j})} \tau,$$

где $j = 1$ учитывает развитие почвенной коррозии, $j = 2$ – коррозионную активность перекачиваемого продукта, $j = 3$ – электромагнитную коррозию, $j = 4$ – биологическую коррозию;

l_k – длина k -того участка; $\tilde{t}$ – экономически и социально приемлемый срок службы конструкции, назначаемый нормами проектирования (например, для магистральных трубопроводов $\tilde{t}$ находится в интервале 35–45 лет); $t_{f,k,j}$ – долговечность по достижению критической толщины k -того участка, которая определяется по теории предельных процессов нагружения [10] и теории усталостного масштабно-структурного разрушения [11]; λ_j , $j = 1, \dots, 4$ – коэффициенты интенсивности потока разрушений (достижения критических толщин участков) от соответствующего вида коррозии, известное по статистике при эксплуатации аналогичных конструкций в аналогичных природно-климатических условиях, $[\lambda_j] = [(км * год)^{-1}]$, (например, для газопроводов РФ выбираются значения $\lambda_j \leq 8.75 * 10^{-5}$, $j = 1, \dots, 4$); $v_{k,j} = v_{k,j}(\tau)$ – скорость развития соответствующих видов коррозии в процессе работы активной катодной защиты и пассивной защищенности (работа защитных покрытий, изоляция, искусственной среды и т.п.) следующего вида:

$$v_{k,j}(\tau) = v_j \frac{(\tau - t_{a,k,j})(\tau - t_{p,k,j})}{\tau^2} h(\tau - t_{a,k,j}) h(\tau - t_{p,k,j}),$$

где под v_j понимаются средние скорости «свободного» изменения глубины дефекта, и, как следствие толщины стенки δ_k , $v_j = d\delta_k / d\tau$,

$t_{a,k,j}$ и $t_{p,k,j}$ – время работы активной (от разности потенциалов) и пассивной (изоляция, напыление и т.п.) защиты от соответствующих видов коррозии, $h = h(y)$ – функция Хевисайда. Действующими нормами ASME [12,13] регламентированы следующие значения допустимых глубины t_a и длины d_a коррозионного дефекта:

$$0.1\delta \leq t_a \leq 0.8\delta, \quad d_a = 1.12 \left(\left(\frac{t_a / \delta}{1.1t_a / \delta - 0.15} \right)^2 - 1 \right) D \delta^{1/2}$$

В реальных условиях ремонту подлежат участки магистральных трубопроводов, имеющие уменьшение толщины стенки до 30% [4]. Из анализа опытных данных по эксплуатации различных участков морских нефтегазовых сооружений следует, что максимальная глубина каверн составляет, в среднем, до 20% толщины стенки.

При эксплуатационном нагружении функции распределения вероятности разрушения от стресскоррозионных дефектов $Q_{k,5} = Q_{k,5}(\tau)$, $j = 5, \dots, 9$, представляются в таком виде [9]:

$$Q_{k,5}(\tau) = \varphi_{k,5}(\tau) e^{1 - \varphi_{k,5}(\tau)}, \quad \varphi_{k,5}(\tau) = \lambda_5 l_k \frac{\tilde{t}}{t_{f,k,5}} \tau,$$

где λ_5 – коэффициент интенсивности потока разрушений (достижение критических размеров стресскоррозионных дефектов), определяемый по статистике при эксплуатации аналогичных конструкций в аналогичных природно-климатических условиях, $t_{f,k,5}$ – долговечность k -того участка по стресскоррозионным дефектам, состоящее из времени формирования «колоний» макротрещин, их слияния до образования магистральной трещины-лидера и достижения ею критических размеров, которая определяется по теории предельных процессов нагружения, теории усталостного масштабно-структурного разрушения [10,11] и известным методам механики разрушения.

При сплошной поверхностной коррозии, которая приводит к уменьшению толщины стенки с равномерным снижением несущей способности, в уравнение для определения долговечности по теории предельных процессов входит скорость коррозии, и материальными кривыми являются кривые длительной $\sigma_{dl} = \sigma_{dl}(t)$ и усталостной $\sigma_{-1} = \sigma_{-1}(\omega, t)$ прочности материала.

В случаях локальной коррозии (мейза-коррозии, язвенной коррозии, питтинга) и стресс-коррозии возникает концентрация напряжений, вызванная коррозионными процессами. В этих случаях в ка-

честве материальных функций теории предельных процессов нагружения рассматриваются кривые длительной $\sigma_{dl} = \sigma_{dl}(t, k_1, k_2, k_3)$ и циклической $\sigma_{-1} = \sigma_{-1}(\omega, t, k_1, k_2, k_3)$ прочности материала в зависимости от параметра k_1 , характеризующего вид и агрессивность окружающей среды, параметра k_2 , зависящего от пассивной защищенности, стабильности грунта и его электрического сопротивления и др., и параметра k_3 , определяющего распределение защитного потенциала [9]. Приведем некоторые зависимости для этих коэффициентов:

$$k_1 = e^{\alpha(T-T_*)^2} \sqrt{1 + \beta(pH - pH_*)^2} [(\alpha_1 pH + \alpha) E_h + \beta_1 pH + \beta_2],$$

$$k_3 = 50(D_e R_T)^{1/2} (\rho_T + 4)^{-3/4} (U \ln(L + 2))^{-1} k_3^{(2)} k_3^{(3)},$$

$$T = T(T_g, T_s); \quad 1 < k_i < 2, \quad i = 1, 2, 3,$$

где в общем случае случайные величины: T_g – средняя температура газа, T_s – средняя температура грунта, E_h – окислительно-восстановительный потенциал окружающей среды, pH – показатель кислотности почвы, ρ_T – удельное электрическое сопротивление грунта, R_T – продольное сопротивление участка, U – разность потенциалов труба-земля, вызванная током катодной поляризации. Коэффициент $k_3^{(2)}$ – коэффициент, отражающий наличие анодной защиты, $k_3^{(3)}$ – коэффициент, отражающий влияние блуждающих токов на коррозионные процессы, $\alpha, \beta, \alpha_1, \beta_1, \beta_2, T_*, pH_* = const$, D_e – внешний диаметр участка, L – расстояние от компрессорной станции до участка по ходу транспортируемого продукта. В настоящее время сверх 80% магистральных газопроводов ПАО «Газпром» эксплуатируется сверх нормативных сроков службы защитных покрытий, поэтому параметр k_2 является существенным параметром.

Критерий безопасности эксплуатации формулируется следующим образом: вероятность разрушения конструкции в течение срока ее безопасной эксплуатации не должна превышать социально и экономически приемлемого значения вероятности разрушения в течение социально и экономически приемлемого срока службы конструкции согласно проекта $\tilde{Q}$ [5]:

$$Q(\tau) \leq \tilde{Q},$$

откуда срок службы конструкции t_f с учетом взаимного влияния коррозионного и усталостного процесса разрушения предлагается находить как

решение такого уравнения:

$$Q(t_f) = \tilde{Q}.$$

В качестве примера приводятся результаты расчета проектных сроков безопасной эксплуатации подземного магистрального газопровода, состоящего из участков с типовыми элементами: основной металл с усталостной трещиной, кольцевое и продольное сварные соединения, отвод, переходник и днище с допустимыми дефектами, при переменном нагружении с учетом коррозионных воздействий.

1. Проблемы прочности, техногенной безопасности и конструкционного материаловедения// под ред. Н.А. Махутова, Ю.Г. Матвиенко, А.Н. Романова. М.: Ленанд. 2018. 720 с.
2. Махутов Н.А. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. М.: МГФ «Знание», 2018. 1016 с.
3. Мазур И.И., Иванцов О.М. Безопасность трубопроводных систем. М.: ИЦ «ЕЛИМА», 2004. 1104 с.
4. Харионовский В.В. Газотранспортная система: исследования конструкций и технического состояния магистральных газопроводов// Вести газовой науки, 2 (44), 2020. с. 162-164.
5. Завойчинский Б.И., Завойчинская Э.Б. Волчанин А.В. Вероятностная оценка остаточных сроков безопасной эксплуатации протяженных конструкций // Справочник. Инженерный журнал. М.: Машиностроение. № 7. 2012. с. 41-46.
6. Завойчинская Э.Б., Овчинникова Н.В. К оценке долговечности протяженных конструкций в сложных природно-климатических условиях// в сб. Материалы XXV Межд. симп. «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. М.: ООО «ТРП». Т.2. 2019. с. 163-171.
7. Баширзаде С.Р., Овчинников И.Г., Овчинников И.И. Прогнозирование поведения трубопроводных конструкций в сложных грунтово-геологических условиях. Часть 3. Учет влияния коррозионного износа //Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, №5, 2017. с.1-16.
8. Завойчинская Э.Б. Оценка долговечности протяженных конструкций при эксплуатационном нагружении// в сб. Научные труды VI Международной научной конференции «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении» (ISBN 978-5-904282-08-0) 2019 М.: Изд-во ИМАШ РАН, 2019. с. 174-176
9. Машиностроение. Энциклопедия. т. IV-3. Надежность машин. Под общ. ред. В.В. Ключева. М.: Машиностроение. 2003. 585 с.
10. Завойчинский Б.И. Долговечность магистральных и технологических трубопроводов (теория, методы расчета, проектирование). М.: Недра, 1992. 271 с.
11. Zavoychinskaya E. Theory of Scale-Structural Fatigue and Structure Durability at Operational Loading, Understanding complex systems, Springer Nature Switzerland AG, 2021. p. 71-89.
12. Pipeline corrosion. Michael Baker Jr., Inc. 2008. 72 p.
13. Managing System Integrity of gas pipelines/ ASME B31.8S-2004-2005/ 61 p.

ВЛИЯНИЕ РАССЕЯНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НА ОЦЕНКУ ПРОЧНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ

В.В. Зацаринный

Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; v.zatsar@mail.ru

Исследовались особенности расчётно-экспериментальных методов получения связи между запасами прочности, характеристиками основных механических свойств и эксплуатационными напряжениями в детерминированной и вероятностной постановке. Приведены примеры оценки прочности и безопасности для ряда отраслей техники.

Ключевые слова. Прочность, надёжность, безопасность, механические свойства, вероятностные методы.

Постановка проблемы.

Как показывает отечественный и зарубежный опыт большинство объектов техносферы в связи со сложным характером эксплуатационных нагрузок, рассеянием основных механических характеристик материалов (ОМС), вариацией конструкторско-технологических факторов должны одновременно удовлетворять при их проектировании как традиционным (прочность, ресурс), так и новым комплексным требованиям (живучесть, безопасность).

Определяющими величинами при такой постановке являются значения основных и локальных механических свойств при разрыве (характеристик прочности σ_T , $\sigma_{0.2}$, σ_B , S_k и пластичности δ и ψ_K) и их рассеяние. В свою очередь указанные ОМС обусловлены стабильностью и особенностями заводской технологии производства материалов. На изменение механических свойств также влияют и особенности эксплуатационного нагружения элементов конструкций.

Так, например, процессы трения поверхностей, локального контактного взаимодействия и общего циклического нагружения, особенно в зонах концентрации, приводят к изменению локальных свойств прочности и пластичности. В этих нагруженных областях происходит изменение напряженно-деформированного состояния, вызывающее накопление поверхностных повреждений и последующие процессы разрушения (появление трещин). Эти факторы влияния имеют статистическую природу и могут существенно сказываться на прочности, живучести и безопасности технических систем.

В связи с этим для надёжной оценки статической и циклической прочности, ресурса, запасов и безопасности необходимо в дополнение к детерминированным рассматривать статистические и вероятностные подходы и их комбинированное использование. В последнее время такие подходы получили своё развитие в ИМАШ РАН.

В общем случае при вероятностном подходе к оценке прочности и безопасности (вероятность не разрушения или разрушения) при определении P должны быть получены (заданы) функции распределения всех основных параметров, характеризующих эксплуатационную нагруженность, физико-механические и геометрические формы. К их

числу относятся эксплуатационные нагрузки P_p^3 , характеристики механических свойств $(\sigma_B, \sigma_T, \sigma_{B\tau}, \sigma_{-1})_p$ и характеристики концентрации напряжений $\alpha_{\sigma,p}$, определяемые по параметрам вероятности

$$P = F\{P_p^3, (\sigma_B, \sigma_T, \sigma_{B\tau}, \sigma_{-1})_p, \alpha_{\sigma,p}\}. \quad (1)$$

Если распределения эксплуатационных напряжений и прочности известны, то можно легко вычислить вероятность возникновения разрушения с оценкой вероятностных статических и циклических запасов прочности n_σ и долговечности n_N .

Методы.

При нормировании прочности заданный запас по установленной вероятности P определяется как

$$n_{\sigma,p} = \frac{(\sigma_c)_p}{(\sigma^3)_p}, \quad (2)$$

где σ_c – предельное (разрушающее) напряжение с заданным уровнем вероятности P (например предел прочности или текучести), $(\sigma^3)_p$ – соответствующее эксплуатационное номинальное напряжение.

Статистическая изменчивость действующих напряжений $(\sigma^3)_p$ и несущей способности или разрушающего напряжения $(\sigma_c)_p$ описывается соответствующими кривыми плотности распределения f .

Ниже показаны функции P распределения эксплуатационных напряжений $P(\sigma^3)$, предела текучести $P(\sigma_T)$ и предела прочности $P(\sigma_B)$ (рис.1) и функции плотности распределения $f(\sigma)$ действующих напряжений и разрушающего напряжения для оценки вероятностей разрушения $P_{(k)}$ при однократном нагружении [1].

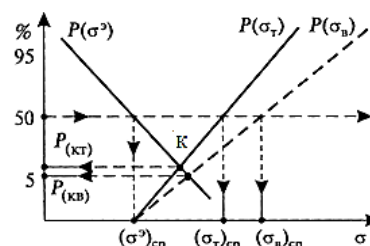


Рис.1. Схема вероятностной оценки прочности при однократном нагружении

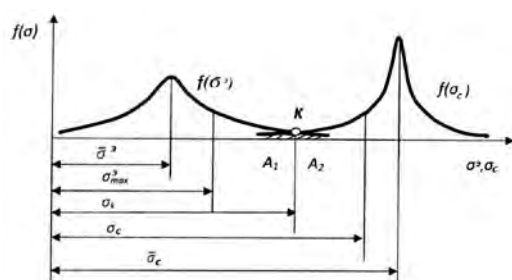


Рис. 2. Кривые плотности распределения нагрузки и несущей способности

Предполагая, что эксплуатационные и предельные напряжения распределены по нормальному закону и используя в расчёте функцию неразрушимости $\psi = \sigma_c - \sigma^2$ по А.Р. Ржаницыну после соответствующих преобразований [1,2] получим вероятность разрушения, которая будет равна

$$P_{\text{разр}} = \frac{1}{2} - \Phi \left(\frac{\bar{n} - 1}{\sqrt{v_\alpha^2 + \bar{n}^2 v_\beta^2}} \right) \quad (3)$$

где $v_\alpha = v_\sigma$ и $v_\beta = v_c$ – коэффициенты вариации действующих нагрузок σ^2 и разрушающих напряжений σ_c ; $\bar{n}$ – запас по напряжениям по средним значениям.

Из этого соотношения вытекает, что вероятность разрушения уменьшается при увеличении запаса прочности $\bar{n}$ по средним значениям разрушающих и действующих напряжений; к такому же результату приводит уменьшение средних квадратичных отклонений и коэффициентов вариации v_σ и v_c . Тогда надёжность (вероятность неразрушения $P_{(n)}$) будет равна

$$P_{(n)} = 1 - P_{(\text{разр})} \quad (4)$$

Характеристику $P_{(\text{разр})}$ часто интерпретируют как технический риск, что является одним из показателей техногенной безопасности.

При проведении расчётов на прочность, ресурс и безопасность важное значение при статическом деформировании приобретает также вероятностное описание уравнений состояния (“σ-ε”) и кинетики местных напряжённо-деформированных состояний в зонах концентрации с учётом рассеяния характеристик ОМС [3]. Новым в предлагаемом подходе к оценке вероятности разрушения является замена в уравнениях диаграмм упругопластического деформирования постоянных (детерминированных) значений основных параметров σ_T , E , m на их расчётные параметры для заданной вероятности P .

$$\sigma = \sigma_T \left(\frac{e}{e_T} \right)^m; \quad \sigma_p = \sigma_{Tp} \left(\frac{e_p}{e_{Tp}} \right)^{mp} \quad (5)$$

где σ_T – предел текучести; m_p – показатель упрочнения ($0 \leq m \leq 1$), его величина определяется вариацией характеристик σ_T , S_k , e_T , ψ_k [1, 3].

Тогда кинетика локальных напряжённо-

но-деформированных состояний в зонах концентрации (“ $\sigma_{\text{max}} - e_{\text{max}}$ ”) при упругопластическом деформировании определяется [4] уравнениями

$$\sigma_{\text{max}} = \sigma_n K_\sigma; \quad e_{\text{max}} = e_n K_e; \quad \{K_\sigma, K_e\} = F_k \{a_\sigma, \sigma_n / \sigma_T, m\}, \quad (6)$$

где σ_n – номинальное напряжение вне зоны концентрации; K_σ, K_e – коэффициенты концентрации напряжений и деформаций при упругопластическом деформировании соответственно; F_k – сложный функционал.

Результаты и их обсуждение.

Выявлена довольно значительная вариация деформаций при статическом нагружении в относительных координатах $\bar{\sigma}_n - \bar{e}_{\text{max}}$ для зоны концентрации в зависимости от рассеяния ОМС при возникновении упругопластических деформаций (рис. 3).

Так, рассеяние местных упругопластических деформаций (максимальных) в зоне концентрации ($\alpha_\sigma = 4,5$) при $\bar{\sigma}_n = 1,2$ составляет 38,5% в обе стороны от среднего значения для обычно принятых коэффициентов вариации свойств v для вероятностей от 0,001 до 0,999. В варианте расчёта для повышенных коэффициентов вариации v при том же напряжении $\bar{\sigma}_n = 1,2$ и α_σ размах вариации локальных номинальных деформаций достигает до 60%, а размах местных максимальных деформаций в зоне концентрации возрастает до 75%. Этому рассеянию местных деформаций может соответствовать квадратичное рассеяние ресурса в области неупругого деформирования (от 1,7 до 3,2).

Таким образом, впервые проведённые исследования показали важность количественного учёта рассеяния базовых характеристик механических свойств ($\sigma_{0,2}$, σ_b , ψ , E) при оценках статической прочности, надёжности и безопасности в зонах и вне зон концентрации напряжений.

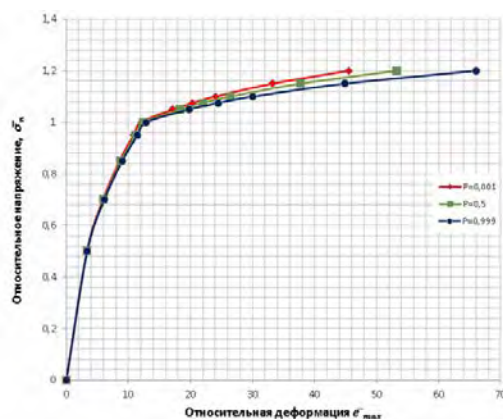


Рис. 3. Диаграмма статического деформирования стали 25Х1МФ в зоне концентрации

Реализация разработанных расчётных подходов на базе выражений (1) – (3) представлена в работах [3,5,6] и на рис.4-5 на примере определе-

ния вероятности разрушения и запасов прочности n_{σ_E} для трёх отраслей техники – ракетной, авиационной и для сосудов давления оборудования АЭС.

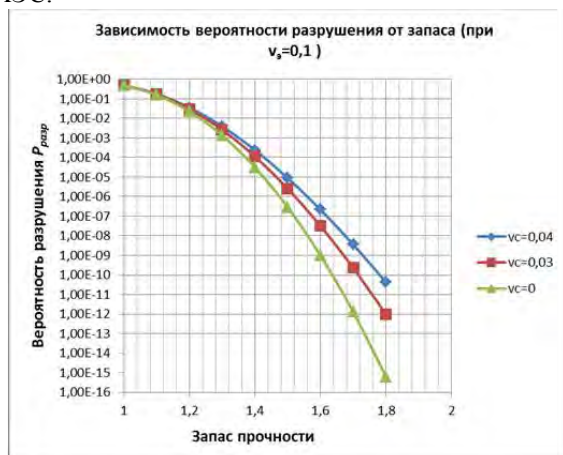


Рис. 4. Зависимость вероятности разрушения от запаса прочности n_{σ_E} при различных сочетаниях коэффициентов вариации нагрузки и прочности для авиационных и ракетных конструкций

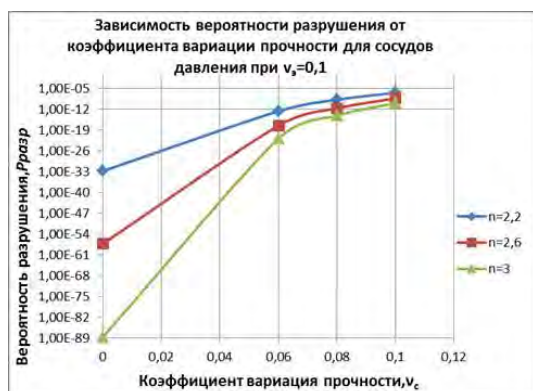


Рис. 5. Зависимость вероятности разрушения от коэффициента вариации прочности v_c по параметру запаса n_{σ_E} для сосудов давления

Из рис. 4 следует, что задавшись предельно допустимой (заданной нормативной) величиной вероятности разрушения $[P_{разр}]$ можно из указанных графиков определить условия безопасности (неразрушения) элементов конструкции, вытекающее из неравенства $P_{разр} < [P_{разр}]$, для различных заданных уровней вариации v_c и v^3 путём установления предельно допустимых запасов прочности $[n_{\sigma_E}]$.

Из рис. 5., при тех же подходах можно определить значение допустимых коэффициентов вариации прочности $[v_c]$ при заданных (фиксированных) n_{σ_E} и v^3 . И также можно получить допустимые коэффициенты вариации нагрузки $[v^3]$ при различных запасах n_{σ_E} и вариациях прочности v_c .

Заключение.

Проведенные расчётно-экспериментальные исследования показали, что для уточнённого вероятностного определения прочности и безопасности важно в расчёте количественно учесть как факторы рассеяния базовых характеристик механических свойств, так и эксплуатационной нагруженности и концентрации напряжений. При этом безопасность конструкций обеспечивается выполнением требований по комплексу запасов по прочности, надёжности и вероятности разрушения.

Работа выполнена при поддержке Проекта РФФИ №20-58-00019 Бел а «Исследование закономерностей экстремального упругопластического деформирования и разрушения с учётом эффектов конструктивной концентрации и контактных воздействий»

1. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Научные основы техногенной безопасности. Науч. рук. Махутов Н.А. – М.: МГОФ «Знание», 2015.-936 с.
2. Степнов М.Н. Вероятностные методы оценки характеристик механических свойств материалов. Новосибирск.: Наука, 2005.-342 с.
3. Проблемы прочности, техногенной безопасности и конструкционного материаловедения/Под ред. Н.А.Махутова, Ю.Г.Матвиенко, А.Н.Романова. М.:ЛЕНАНД, 2018,-720 с.
4. Махутов Н.А. Прочность и безопасность: фундаментальные и прикладные исследования. Новосибирск.: Наука, 2008. -528 с.
5. Махутов Н.А., Зацаринный В.В. Анализ прочности и техногенной безопасности с учётом вероятностных характеристик сопротивления деформированию и разрушению. Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций, №6, 2019, С. 4-15.
6. Махутов Н.А., Зацаринный В.В., Резников Д.О. Особенности статистических подходов при оценке статической прочности. Безопасность в техносфере, 2014, №2, С.33-39.

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ АЛГОРИТМ И ПРОГРАММА РЕШЕНИЯ КОНТАКТНЫХ ЗАДАЧ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ «КОНТАКТНОЙ СРЕДЫ»

М.В. Зернин, А.П. Бабин, А.А. Просолович

Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия, zerninmv@mail.ru

Реализована методика решения контактных задач на основе модели механики «контактной среды». Используется «комбинированный» алгоритм решения нелинейных задач, связанный с программным комплексом FEMAP для подготовки сеток и обработки результатов расчетов.

Введение.

Известны методики решения контактных задач с использованием понятия «контактная среда», которая моделируется контактными конечными элементами (ККЭ) [1-5]. Такие нелинейные задачи не всегда сходятся. В Брянском государственном техническом университете был разработан и программно реализован «комбинированный алгоритм» решения нелинейных задач [6-9], сходящийся для многих типов нелинейностей, в том числе и при скачкообразном изменении свойств материалов. Но разработанная ранее программа [9] не имела современного интерфейса для подготовки исходных данных и представления результатов расчетов. В настоящее время реализованы [10] связи «комбинированного алгоритма» и программного пакета FEMAP, используемого для эффективной подготовки данных и анализа результатов расчетов.

Нелинейная «контактная среда».

На рис. 1 приведено схематическое изображение характеристик жесткости контактной среды в нормальном (рис. 1а) и касательном (рис. 1б) направлениях. Видно, что на этих нелинейных характеристиках различается направления выпуклости участков кривых. А на характеристиках касательных свойств имеются скачки (разрывы) при переходе от предвзрывного смещения к скольжению.

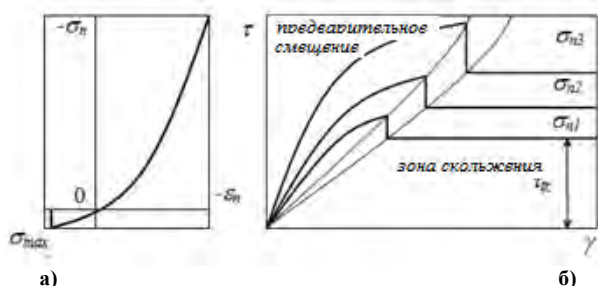


Рис. 1. Характеристики «контактной среды» в нормальном (а) и касательном (б) направлениях

Если между поверхностями имеется зазор, то его тоже можно рассматривать как особые свойства «контактной среды» (рис. 2). Таким образом «внешний» тип нелинейности (поиск площадки контактирования) преобразуется к «внутреннему» типу нелинейности (свойства ККЭ). Отыскание площадки контактирования сводится к отысканию для каждого ККЭ точки на диаграмме его деформирования.

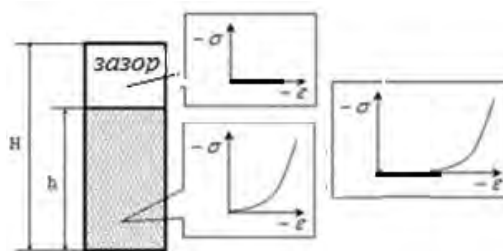


Рис. 2. Нормальная жесткость «контактной среды» при наличии зазора между поверхностями

«Комбинированный алгоритм» решения нелинейных задач.

Ранее предпринимались [1-5] попытки решать задачи с подобными нелинейными материалами методами теории пластичности. Например, в методе дополнительных деформаций нелинейное физическое уравнение представлено в виде $\{\sigma\} = [D] \cdot (\{\varepsilon\} - \{\varepsilon^*(\sigma)\})$, а в методе дополнительных напряжений – в виде $\{\sigma\} = [D] \cdot \{\varepsilon\} + \{\sigma^*(\varepsilon)\}$. Здесь $\{\sigma^*\}$ и $\{\varepsilon^*\}$ – соответственно векторы дополнительных напряжений и деформаций, в которые сведены все нелинейные составляющие уравнения. Изменяя такие параметры на каждой итерации, можно решить нелинейную задачу как рекуррентную последовательность линейных задач. Многочисленные расчеты показали, что эти методы не для всех типов нелинейных свойств обеспечивают сходимость.

Поэтому нами был предложен [6] «комбинированный метод», в котором нелинейными слагаемыми являются и дополнительные деформации и дополнительные напряжения $\{\sigma\} = [D] \cdot (\{\varepsilon\} - \{\varepsilon^*\}) + \{\sigma^*\}$. В зависимости от типа диаграммы свойств ККЭ будет реализована сходимость или по схеме метода дополнительных деформаций или по схеме метода дополнительных напряжений (рис. 3)

Использование «комбинированного алгоритма» позволяет решать задачи с различными нелинейными свойствами и эффектами [6-8]. На рис. 4 представлен переход от трения покоя к микропроскальзыванию. На рис. 5 – учет истории нагружения для нормальных и касательных напряжений в контакте. Здесь анализируются процессы в контактном слое при ступенчатом изменении внешнего воздействия, таком как нагрузка, разгрузка, повторная нагрузки и т.п. Учет анизотропии трения осуществляется (рис. 6) посредством определения «приведенных» (экви-

валентных) свойств и направлений, определяемых свойствами поверхностного слоя в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

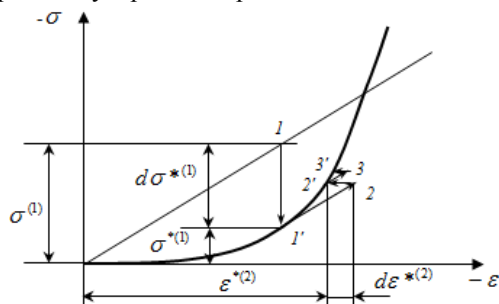


Рис. 3. Схема сходимости при использовании «комбинированного алгоритма»

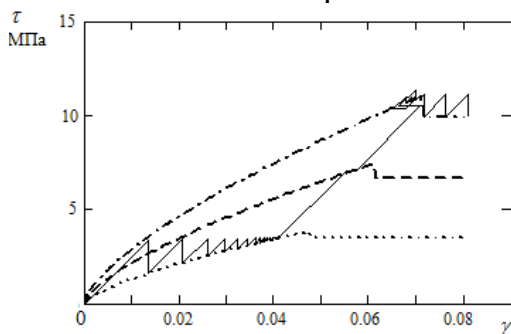


Рис. 4. Схема сходимости касательных контактных напряжений при переходе от трения покоя к скольжению

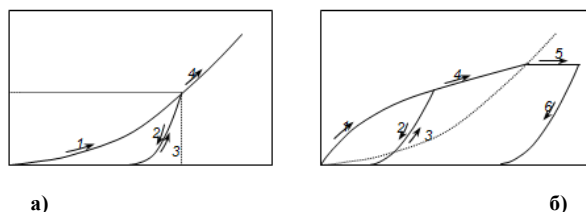


Рис. 5. Учет ступенчатых (нагрузка – разгрузка и т.п.) этапов приложения сил в нормальном (а) и касательном (б) направлениях

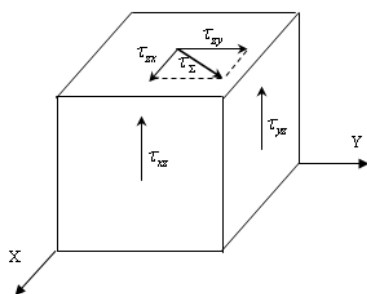


Рис. 6. Учет анизотропии трения (различных характеристик контактного слоя в различных направлениях)

По «комбинированному алгоритму» кроме небольших модельных задач, демонстрирующих его возможности, решено несколько практических задач. Найдено объяснение причин появления необычно ориентированных усталостных трещин во вкладыше подшипника скольжения оппозитного компрессора. Показано [11], что появляются условия для фреттинг- процессов. Предложена модификация вкладыша такая, чтобы фреттинга не было. Более точно проанализированы опыты Н.Б. Демкина (рис.

7) по определению контактной жесткости [12].

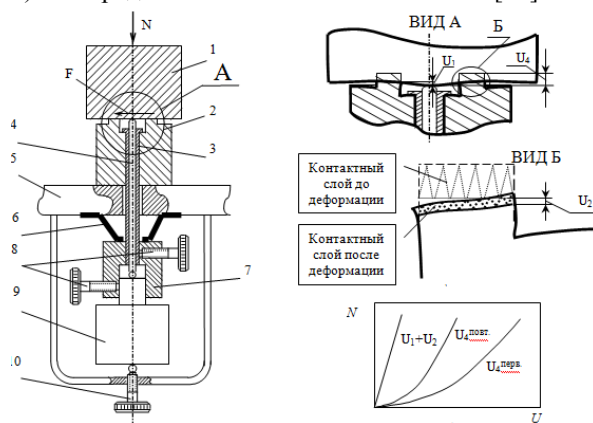


Рис. 7. Схема установки [8] для определения контактной жесткости (а) и расчетная схема (б) для более точного анализа результатов экспериментов

На рис. 8 приведены результаты решения упруго-пластических задач о внедрении различных инденторов в покрытие. Задачи решены [6] совместно с сотрудниками ИММС НАНБ (г.Гомель).

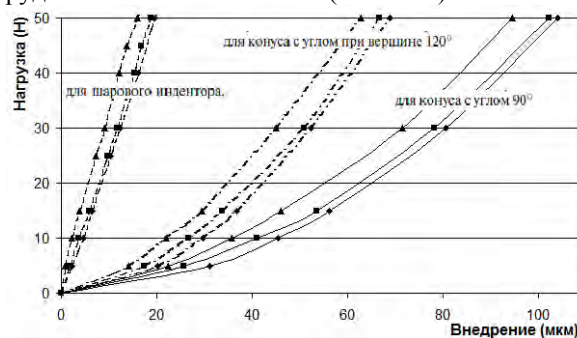


Рис. 8. Внедрение инденторов (конуса с углом 90 и 120 град. и шар $r=0.5$ мм) в упруго-пластические покрытия (толщинами 5, 15 и 30 мкм)

Реализация связи «комбинированного» алгоритма с препроцессором FEMAP

Перечисленные выше примеры решены с применением программы [9], имеющей ограниченные возможности по подготовке исходных данных и анализа результатов расчета. В настоящее время программный комплекс FEMAP [13] широко применяется для реализации указанных этапов конечно-элементных расчета. В качестве решателей используются комплексы NASTRAN [14], ANSYS [15] или другие. В настоящее время аналогичные связи (рис. 9) «комбинированного алгоритма» и FEMAP нами тоже реализованы [10].

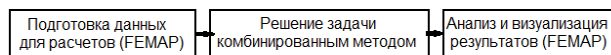


Рис. 9. Схема связей «комбинированного» алгоритма и комплекса FEMAP

Разработан алгоритм обработки информации о созданной в программном комплексе «FEMAP with NX Nastran» модели. В алгоритме учтены все особенности представления данных, обязательные для корректной работы программы расчета контактных

задач (перенумерация узлов и элементов, ориентирование ККЭ относительно контактирующих тел и др.). Разработанный алгоритм реализован на ЭВМ, изменена часть кода программы [9], отвечающая за создание конечно-элементной модели исследуемого объекта и реализующая функции взаимодействия этой программы с обработанными данными о модели, созданной в программном комплексе «FEMAP with NX Nastran».

После того, как модель построена, заданы кинематические и силовые граничные условия, эта информация выгружается в отдельный документ. Во вкладке List нужно выбрать пункт Destination, здесь указать путь к текстовому файлу, в который будет выгружена информация. Далее необходимо задать, какая конкретно нужна информация. В той же вкладке List выбирается пункт Model и поочередно из списка нужно выбрать пункты Node, Element, Constrain – Individual, Load – Individual. Таким образом выводится информация поочередно об узлах, элементах, условиях закрепления и нагрузках. Соблюдение именно такого порядка обязательно, так как именно в такой последовательности программа – решатель обрабатывает входные данные.

В качестве примера была решена задача о поиске площадки контакта пластины и кольца (рис. 10а) с расположенным между ними тонким слоем с нелинейными свойствами по рис. 1 и рис. 2. По этим данным в среде «Femap with NX Nastran» была построена конечно-элементная модель (рис. 10б). Задача решена для различных значений внешних нагрузок.

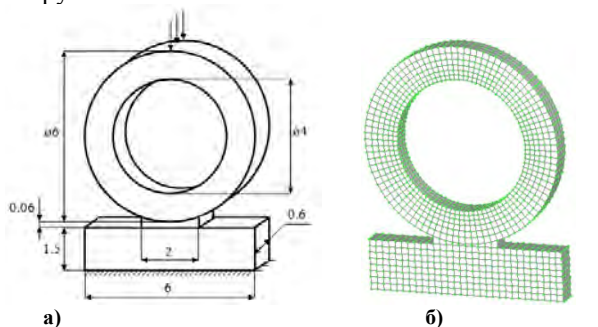


Рис. 10. Модель (а) и конечноэлементная сетка (б) для задачи о контактировании податливого кольца и основания через шероховатый слой

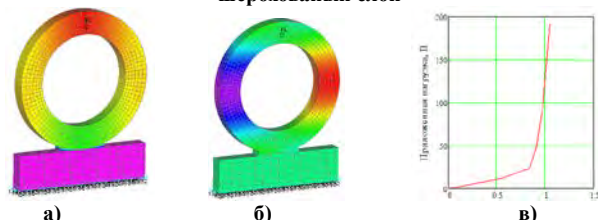


Рис. 11. Картины перемещений (а) напряжений (б), а также зависимость (в) ширины площадки контакта от нагрузки

В результате работы «комбинированного алгоритма» были получены значения перемещений всех узлов конечных элементов исследуемой модели на каждой итерации. Эти результаты преобразованы к виду, необходимому для выполнения анализа в комплексе «FEMAP with NX Nastran». На рис. 11а

-11б приведены картины перемещений в вертикальном направлении и напряжений. На рис. 11б приведены значения ширины площадки контакта в зависимости от величины нагрузки.

Заключение.

Разработан алгоритм преобразования информации о созданной в программном комплексе «FEMAP with NX Nastran» модели к виду, необходимому для решения задачи по «комбинированному» алгоритму. Алгоритм реализован на ЭВМ и протестирован, результаты работы согласуются с ожидаемыми. Ход расчета сопоставлялся с ходом расчета программы без внесенных изменений. В итоге была достигнута идентичность результатов, получаемой прежней версией программы и новой.

- [1] Fredriksson B. Finite elements solution of surface nonlinearities in structural mechanics with special emphasis to contact and fracture mechanics problems // Comput. and Struct. 1976. V. 6. № 4-5. P. 281-290.
- [2] Michalowski R., Mros Z. Associated and non-associated sliding rules in contact friction problems // Arch. mech. stow. 1978. V. 30. № 3. P. 259-276.
- [3] Кузьменко А.Г. Основные уравнения теории упругости и пластичности и метод конечного элемента. Тула: Тульский политех. ин-т, 1980. 99 с.
- [4] Подгорный А.Н., Гонтаровский П.П., Киркач Б.Н. и др. Задачи контактного взаимодействия элементов конструкций. Киев: Наук. думка, 1989. 232 с.
- [5] Никишков Г.П., Пашнин В.Г. Расчет напряженного состояния контактирующих тел с использованием изопараметрических контактных конечных элементов// Прочность материалов и элементов конструкций атомных реакторов. Сб. научн. тр. МИФИ. М.: Энергоатомиздат, 1985. С. 38-43.
- [6] Бабин, А.П., Зернин М.В. Конечноэлементное моделирование контактного взаимодействия с использованием положений механики контактной псевдосреды.//Изв./ РАН. Механика твердого тела. – 2009. - №4. - С. 84-107
- [7] Зернин М.В., Бабин А.П. Алгоритм комбинированного метода решения конечноэлементных задач с нелинейностями различного типа // Вестник Брянского государственного технического университета, 2009. - №4. - С. 57-64.
- [8] Бабин, А.П., Зернин М.В. Учет влияния нелинейных свойств поверхностных слоев при конечноэлементном решении задач о контактном взаимодействии деформируемых тел // Трение и смазка в машинах и механизмах – 2008. - № 3. - С. 3-16.
- [9] Программа моделирования нелинейных эффектов при решении контактных задач. А.П.Бабин, М.В.Зернин. /Зарегистр. в Федер. службе по интелл. собств. (Роспатент) 12.10.17. - Свид. № 2017661434
- [10] Бабин А.П., Зернин М.В. Просолович А.А. Использование препроцессора FEMAP совместно с комбинированным методом решения нелинейных конечноэлементных задач// Вестник Брянского государственного технического университета. -2019.- №4(77). - С.83-92
- [11] Зернин М.В., Бабин А.П., Мишин А.В., Шилько С.В. Анализ механизма износо-усталостного повреждения и результаты модификации подшипников компрессора // Трение и износ- 2007. – Т. 28. №6.- С. 591-599.
- [12] Демкин Н.Б. Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей. М.: Наука, 1970. 227 с.
- [13] Рудаков, К.Н. UGS Femap 9.3. Геометрическое и конечно-элементное моделирование конструкций. - М.: ДМК Пресс., 2009– 296 с.
- [14] Шимкович, Д.Г. Расчет конструкций в MSC/NASTRAN for Windows- М.: ДМК Пресс, 2001. - 448 с.
- [15] Морозов, Е.М. ANSYS в руках инженера /Е.М.Морозов.– М.: Ленанд, 2010. – 456 с.

УСТАЛОСТЬ И РАЗРУШЕНИЕ ГИБРИДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ МАЛОЦИКЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ

А.В. Зинин¹, Н.С. Азиков²

¹Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия;
allzin@yandex.ru

²Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия

На основе модельных представлений о характере разрушения гибридов при кратковременном нагружении исследована их усталостная прочность при малоцикловом нагружении. Установлено, что для материалов с низкой сдвиговой прочностью увеличение количества слоев высокомодульного материала улучшает усталостные свойства гибридов при растяжении, что выражается в уменьшении наклона кривых малоциклового усталости. Усталостные свойства материалов с повышенной сдвиговой прочностью определяются свойствами низкокомодульных слоев.

Введение

Разработка гибридных композиционных материалов, принцип создания которых основан на сочетании нескольких армирующих наполнителей с различными упругими и прочностными свойствами в одной матрице, предоставляет возможность управлять механическими свойствами всего композита в целом [1,2]. Цель гибридации - создать новый материал, который реализует преимущества своих компонентов и снижает влияние их недостатков. С этой целью слоистые гибридные композиции обычно представляют собой объединение слоев с более жестким высокомодульным (high modulus) наполнителем со слоями низкокомодульного (low modulus), но более прочного компонента.

В работе представлены результаты экспериментального исследования механических свойств и процессов разрушения гибридных композитов при кратковременном и малоцикловом нагружении. Объектами исследования служили однонаправленные эпоксидные стеклоуглепластики (СУП1; СУП2) и органоупругие (ОУП) со слоистой гибридацией на основе 2 видов стеклотканей Т-25 и органоткани 7Т как низкокомодульного компонента и углеродных лент 3 типов ЛУ и ЛУ-П в качестве высококомодульных слоев.

Прочность гибридных слоистых композитов

Простейшей моделью, используемой для прогнозирования упругих характеристик композита с несколькими видами армирующих элементов, является правило смесей [3], аддитивные соотношения которого получены в предположении идеальной связи между отдельными слоями. Для гибридных материалов с 2 типами слоев эти соотношения имеют вид:

$$A_{kc} = \mu A_{k\text{lm}} + (1 - \mu) A_{k\text{hm}}$$

где $A_k = \{E_1; E_2; G_{12}; \nu_{12}\}$; c, lm, hm - индексы характеристик композита, низкокомодульного и высококомодульного компонентов соответственно; μ - объемная доля низкокомодульных lm -слоев.

При монотонном нагружении гибридного материала в направлении армирования разнородные слои разрушаются одновременно из-за различия в их предельных деформациях ($\varepsilon_{\text{hm}} < \varepsilon_{\text{lm}}$). В связи с этим в зависимости от степени гибридации, которая может быть оценена объемной долей высококомодульного компонента ($1 - \mu$; $0 < \mu < 1$), прочность всей композиции определяется формулами, следующими из правила смеси:

$$\begin{aligned} \sigma_s &= \varepsilon_{\text{hm}} [\mu E_{1\text{lm}} + (1 - \mu) E_{1\text{hm}}] \quad \text{при } \mu < \mu_{cr}; \\ \sigma_s &= \varepsilon_{\text{lm}} \mu E_{1\text{lm}} \quad \text{при } \mu > \mu_{cr}. \end{aligned} \quad (1)$$

Критическое содержание μ_{cr} низкокомодульных слоев, при котором возможно одновременное разрушение всех компонентов гибрида и прочность композиции минимальна, зависит от различий в упругих характеристиках компонентов:

$$\mu_{cr} = \frac{\varepsilon_{\text{hm}} E_{1\text{hm}}}{\varepsilon_{\text{lm}} E_{1\text{lm}} + \varepsilon_{\text{hm}} (E_{1\text{hm}} - E_{1\text{lm}})}$$

Фактически соотношения (1) означают, что при высокой степени гибридации путем введения в низкокомодульный композит значительной доли более жестких слоев ($\mu < \mu_{cr}$) исходные lm -слои не реализуют полностью свои прочностные свойства, поскольку разрушение гибрида в этом случае происходит при деформациях, далеких по уровню от предельных для низкокомодульного компонента. При низкой степени гибридации ($\mu > \mu_{cr}$) более хрупкие hm -слои, разрушившись при достижении своей предельной деформации ε_{hm} , полностью перестают участвовать в распределении нагрузки, и несущая способность всего композита после этого определяется исключительно сопротивлением более податливого компонента гибрида. На рис.1, где показано изменение прочности исследованных гибридных композитов в зависимости от доли высококомодульных слоев ($1 - \mu$), прямые построены по соотношениям (1).

Однако экспериментальные результаты многих работ свидетельствуют об отклонениях от этой тео-

рии и служат основанием для обоснования «гибридного эффекта», который обычно трактуется в литературе как положительное или отрицательное отклонение количественной характеристики некоторого механического свойства от правила смесей.

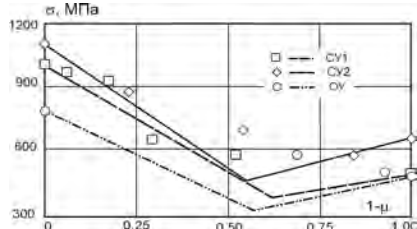


Рис.1 Изменение прочности гибридов при растяжении в зависимости от степени гибридации

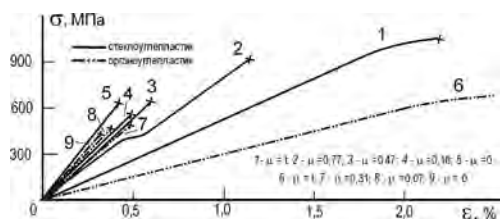


Рис.2 Диаграммы деформирования при растяжении стеклоуглепластика СУ2 (1-5) и органоуглепластика ОУ (6-9)

Проявление гибридного эффекта наблюдается на диаграммах деформирования исследованных материалов (рис.2). Так, для стеклоуглепластика СУ2 при $\mu = 0,47$ отсутствует характерный перелом диаграммы, соответствующего достижению предельной деформации h_m -слоев, а при $\mu = 0,77$ величина вторичного модуля упругости несущественно отличается от его начального значения. Диаграммы 2,3,4 и 7, 8 свидетельствуют о превышении деформациями разрушения предельных величин для высокомодульного компонента. В литературе широко обсуждаются механизмы таких синэргических эффектов в гибридных композитах [3-6]. В качестве факторов, определяющих их появление, указывают неполное разрушение высокомодульного компонента в гибриде, остаточные напряжения в результате термомеханических явлений при формировании слоистой структуры, сильная дисперсия экспериментальных результатов и др. Однако наиболее вероятным обоснованием гибридного эффекта следует считать механизм множественного разрушения, характерный для многих гетерогенных структур [3,5]. Множественное разрушение представляет собой процесс зарождения и развития в более хрупком компоненте повреждений и трещин, распределенных («рассеянных») по объему, занимаемому хрупким компонентом, вследствие статистической неоднородности его прочности. Однако даже при деформациях, близких по величине предельным для высокомодульного компонента гибрида, микротрещины устойчивы, т.к. их рост до некоторых пор сдерживается окружающими поврежденную область менее жесткими h_m -слоями. Деформация поврежденных областей в виде раскрытия микротрещин снижает общую

жесткость гибридной структуры, что выражается в увеличении предельной деформации всего композита, т.е. в «гибридном эффекте». Кроме того, существенную роль в обеспечении несущей способности в зоне разрушения области h_m -слоя играют сдвиговые процессы. Приближенный сдвиговой анализ [4] показывает наличие в области повреждения концентрации нормальных напряжений в h_m -слое и межслойных напряжений сдвига, которые локализуются в пределах неэффективной длины структурных элементов слоя (волокон, жгутов и т.п.) [7]. Коэффициенты концентрации напряжений зависят от соотношения характеристик упругости компонентов гибрида:

$$K_\sigma = 1 + C(\beta_1 - \beta_2); \quad K_\tau = \sqrt{\frac{G h_{lm}}{E_{lm} h}} \cdot C(\beta_1^2 - \beta_2^2)$$

$$C = [\beta_1(2 - \beta_1^2) - \beta_2(2 - \beta_2^2)]^{-1}$$

$$\beta_{1,2} = \sqrt{(1 + k^{-1}) \pm (1 + k^{-2})}; \quad k = \frac{E_{lm} h_{hm}}{E_{lm} h_{lm}}$$

Здесь G, h - модуль сдвига и толщина прослойки связующего; h_{hm}, h_{lm} - толщины h_m - и h_{lm} -слоев.

Концентрация растягивающих и сдвиговых напряжений обуславливает возможность двух видов разрушения: разрыва h_m -слоев и расслоения, что отмечается в экспериментах.

Малоцикловая усталость гибридных композитов

Неодновременность разрушения компонентов гибридных материалов проявляется при нагружении их циклическими нагрузками в малоцикловой области, когда деформации значительно превышают предельные значения для слоев высокомодульного материала. Поэтому сопротивление гибридных композитов малоцикловому нагружению качественно отличается от их многоциклового усталости и во многом определяется структурными параметрами материала.

Экспериментальное исследование малоциклового усталости гибридных материалов проводилось при циклическом растяжении образцов стекло- и органоуглепластиков в форме двухсторонней лопатки с постоянной скоростью деформации. Режим нагружения мягкий. Цикл пульсирующий, коэффициент асимметрии $\square 0,02$; частота нагружения 1...2 цикл/мин. База испытаний 104 циклов. Для построения кривых усталости испытывались от 9 до 18 образцов каждой композиции. Результаты испытаний представлены на рис.3. По результатам усталостных испытаний получены кривые малоциклового усталости всех типов гибридных материалов с линейными уравнениями в полулогарифмических координатах:

$$\sigma_{\max} = a - b \lg N$$

Статистический анализ показывает, что отношение средняя значение отношения коэффициента a к пределу кратковременной прочности σ_s для всех испытанных партий составляет 1,03 при коэффици-

енте вариации 4%, т.е. $a \approx \sigma_e$, что дает возможность обосновать единую кривую усталости гибридных материалов в виде:

$$\sigma_{\max} / \sigma_e = 1 - B \lg N$$

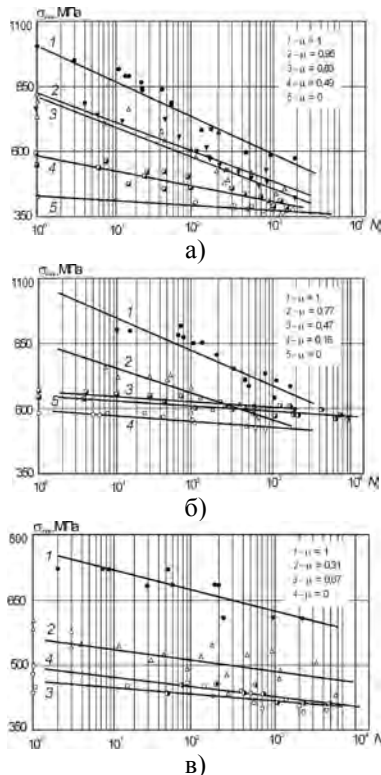


Рис.3 Кривые малоциклового усталости при растяжении стеклоуглепластиков СУ1 (а) и СУ2 (б) и органоуглепластика ОУ (в)

При малоцикловом растяжении механизмы разрушения гибридных материалов близки к механизмам разрушения при кратковременном нагружении. На рис. 4 показаны образцы стекло- и органоуглепластиков после разрушения при циклическом растяжении нагрузками, соответствующими $0,8 \sigma_e$.

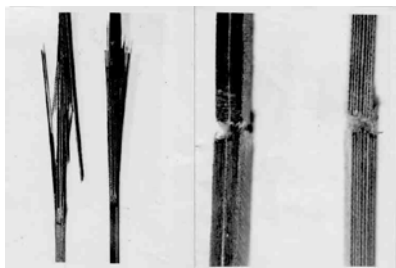


Рис.4 Вид разрушенных образцов при малоцикловом растяжении стеклоуглепластика СУ2 и органоуглепластика ОУ

Разрушение стеклоуглепластиков происходило с образованием обширных областей расслоения, тогда как органоуглепластики разрушались разделением на две части по механизму хрупкого разрушения. Экспериментальные результаты показывают, что различие механизмов разрушения гибридных композитов существенным образом складывается на их усталостной прочности.

Для стеклоуглепластиков, разрушающихся путем расслоения, установлено уменьшение наклона кривых малоциклового усталости с увеличением объемной доли hm-компонента, что говорит о положительном эффекте введения углепластиковых слоев в низко модульный композит. Исключение составляют результаты испытаний при объемном содержании слоев стеклоткани $\mu = 0,16$, для которого предельное состояние определяется разрушением lm-слоев. Предел малоциклового усталости на базе 10^3 циклов незначительно изменяется в зависимости от объемного содержания компонентов, вследствие чего существует область в интервале $(2...5) \cdot 10^3$ циклов, где усталостная прочность всех однотипных композиций примерно одинакова.

Разрушение материалов с повышенной сдвиговой прочностью (органоглепластиков) происходит вследствие усталости перегруженных низко модульных слоев. В этом случае несущая способность всей, гибридной композиции определяется усталостными свойствами lm-составляющей гибрида, с учетом максимальной концентрации напряжений в зоне повреждений hm-слоя.

Коэффициент K_y усталости в виде отношения предела выносливости σ_R на базовом числе циклов к разрушающему напряжению при кратковременном нагружении σ_e для стеклоуглепластиков увеличивается с ростом объемного содержания hm-слоев следующим образом:

$$K_{y\ c} = K_{y\ lm} + [K_{y\ lm} - K_{y\ hm}](1 - \mu)^m$$

Для стеклоуглепластика СУ1 $K_{y\ hm} = 0,915$; $K_{y\ lm} = 0,589$; $m = 0,78$; для СУ2 $K_{y\ hm} = 0,975$; $K_{y\ lm} = 0,606$; $m = 0,47$. Коэффициент усталости органоуглепластиков примерно соответствует коэффициенту усталости органоупластика без гибридации – $K_y = 0,819$.

1. Степнов М.Н., Зинин А.В. Прогнозирование характеристик сопротивления усталости материалов и элементов конструкций. — М., Инновационное машиностроение, 2016. — 392 с.
2. Zuo P., Srinivasan D. V. Vassilopoulos A. P. Review of hybrid composites fatigue // Composite Structures. 2021.v. 274, 114358,
3. Kretsis, G. A review of the tensile, compressive, flexural and shear properties of hybrid fibre-reinforced plastics. Composites. 1987, 18, 13–23.
4. Зинин А.В. Структурная модель разрушения гибридных композиционных материалов при растяжении // Научные труды (Вестник МАТИ). 2014. № 24 (96). С. 10-16
5. Зайцев Г.П., Зинин А.В. Исследование малоциклового усталости гибридных композиционных материалов // Малоцикловая усталость – механика разрушения, живучесть, материалоемкость конструкций. 1983. С. 244-250.
6. Зинин А.В. Сопротивление малоциклового усталости гибридных композиционных материалов и элементов летательных аппаратов из них. Дисс...канд. тех. наук. М.: МАТИ, 1983.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЛАСТИЧНОГО СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ СОЛИДОЛА И ПОЛИМОЧЕВИНЫ

В.А. Зорин¹, Ле Чонг Туан¹, М.Н. Ерофеев², И.А. Буяновский²,
В.Д. Самусенко², Ю.И. Щербаков²

¹Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия;
madi-dm@list.ru

²Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва, Россия

Приведены результаты лабораторных исследований трибологических свойств нового пластичного смазочного материала на основе Солидола Ж, полимочевины и комплекса присадок, обеспечивающего повышение температуры каплепадения до 118 °С. Установлено, что предлагаемый пластичный смазочный материал работоспособен в более широком температурном диапазоне, обеспечивает более высокие противоизносные свойства деталям трибосопряжения и существенно снижает потери на трение при граничной смазке по сравнению с оригинальным пластичным смазочным материалом Солидол Ж. Разработанный состав пластичного смазочного материала предполагается применять при эксплуатации дорожно-строительных машин в тропических условиях (на примере Вьетнама).

Введение

Как известно, эффективность использования смазочных материалов в значительной степени зависит от климатических условий эксплуатации изделий машиностроения (в том числе дорожно-строительных машин). В тропическом климате (на примере Вьетнама), характеризующемся экстремальными значениями температуры и влажности окружающей среды, происходит быстрая утрата работоспособности традиционных смазочных материалов. В связи с этим, разработка специальных пластичных смазочных материалов для тропических условий эксплуатации дорожно-строительных машин (ДСМ) является исключительно актуальной и перспективной задачей, о чем свидетельствуют результаты исследований в работах [1-3].

Исследованиями, проведёнными авторами [3] было установлено, что дополнительное введение в традиционный состав Солидола Ж 26 масс.% полимочевины и присадок 1 масс.% Агидол-2 (антиоксидант, является стабилизатором широкого спектра действия) и 1 масс.% АКОР-1 (маслорастворимый ингибитор коррозии) позволяет повысить температуру каплепадения до 118 °С, что вполне достаточно для применения в узлах трения ДСМ в анализируемых условиях (температура каплепадения должна быть не ниже 100 °С).

Целью работы было сравнение трибологических свойств разработанного пластичного смазочного материала (Солидол Ж(мод.)) со смазкой Солидол Ж, которая выступила в качестве основы для модификации.

Методы исследований

В настоящее время, одними из наиболее распространённых лабораторных методов оценки трибологических свойств пластичных смазочных материалов являются стандартизованные испытания на четырёхшариковых машинах (ЧШМ) в соответствии с ГОСТ 9490-75 и зарубежными аналогами.

Программа сравнительных испытаний образцов пластичных смазочных материалов была разработана на основе результатов ранее проведённых теоретических и экспериментальных исследований [4-6], которые осуществлялись с использованием оборудования центра коллективного пользования Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН.

Противоизносные свойства пластичных смазочных материалов оценены по показателю износа $D_{\text{и}}$ на четырёхшариковой машине трения ИМАШ по ГОСТ 9490-75.

Для оценки трибологических свойств смазочного материала под воздействием высоких температур, испытания проводились также по четырёхшариковой схеме на машине трения КТ-2 [4], которая позволяет оценивать коэффициент трения в широком диапазоне рабочих температур. Образцы – шарики из стали 100Cr6 диаметром 7,94 мм, нагрузка на узел трения 107,8 Н, частота вращения верхнего шара 1 мин⁻¹. Пластичным смазочным материалом заполнялась только оправка с шариками. Исследование проводили в интервале температур 30÷250 °С. Температура узла трения ступенчато повышалась со скоростью ~4 °С/мин. Коэффициент трения оценивали в течение 60 с через каждые 10 °С. По результатам испытаний определяли закономерность изменения коэффициента трения f от температуры T для испытанных образцов.

После трибологических испытаний шарики промывали в растворителе для удаления остатков смазочного материала, на оптическом микроскопе измеряли диаметр пятен износа и делали фотографии, для оценки степени повреждения поверхности образца.

Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 1. приведены фотографии пятен износа, полученные в результате испытаний образцов сравниваемых смазочных материалов при определении их противоизносных свойств по ГОСТ 9490-75.

Средний диаметр пятен износа составил 754 мкм для Солидол Ж и 504 мкм для Солидол Ж(мод.).

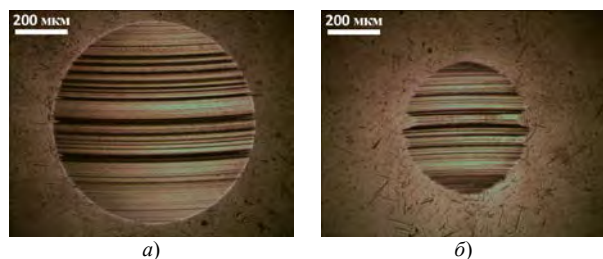


Рис. 1. Микрофотографии пятен износа при испытаниях по ГОСТ 9490-75: а) Солидол Ж; б) Солидол Ж(мод.)

Как видно из рис. 1, диаметр пятна износа предлагаемого образца пластичного смазочного материала существенно меньше, чем у Солидола Ж (уменьшение на 33%), что свидетельствует о более высоких противоизносных свойствах модифицированной смазки.

Результаты испытаний на машине КТ-2 по ГОСТ 23.221-84 образцов сравниваемых пластичных смазочных материалов приведены на рис. 2 в виде зависимостей коэффициента трения от температуры. Смазка Солидол Ж испытывалась только до температуры 100 °С, так как при этой температуре смазка полностью расплавлялась и дальнейшие испытания производить не целесообразно (на рис. 3 показана оправка со смазкой до испытания и после испытаний до 100 °С). Образец модифицированной смазки Солидол Ж(мод.) испытывали до 250 °С.

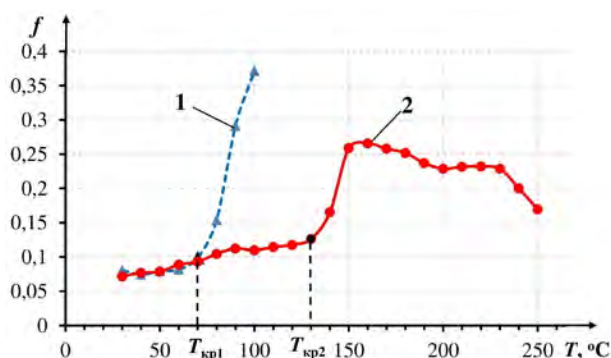


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения f от температуры T испытанных образцов: 1 – Солидол Ж; 2 – Солидол Ж(мод.)

В результате проведенных исследований установлено, что сравниваемые образцы пластичных смазочных материалов имеют четко выраженные критические температуры $T_{кр}$ – 70 °С для Солидол Ж и 130 °С для Солидол Ж(мод.). До наступления критических температур $T_{кр}$ исследуемых пластичных смазочных материалов коэффициент трения постепенно возрастает с повышением температуры, после достижения $T_{кр}$ коэффициент трения резко возрастает. В диапазоне температур 130÷150 °С коэффициент трения модифицированного пластичного смазочного материала особенно резко повышается вследствие разрушения структуры пластичного смазочного ма-

териала под воздействием температуры. При температурах выше 160 °С происходит снижение коэффициента трения, вероятно, обусловленное окислительными процессами в смазке и образованием на поверхностях устойчивой плёнки.

Коэффициент трения при испытании Солидол Ж(мод.) сохраняет стабильность в более широком температурном диапазоне (критическая температура $T_{кр} = 130$ °С) и смазка остаётся работоспособной при $T = 100$ °С, по сравнению с Солидол Ж (рис. 3).

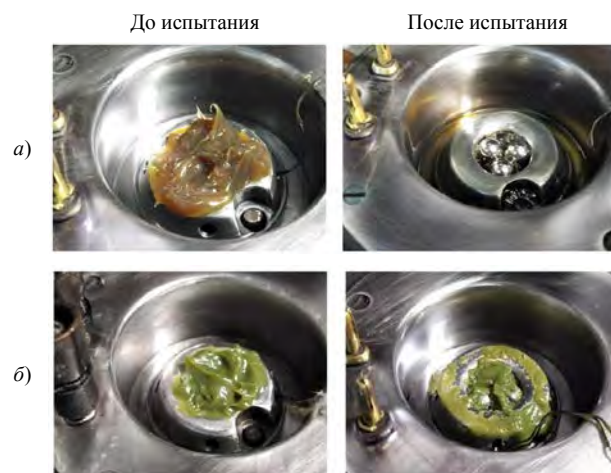


Рис. 3. Фотографии оправки со смазочным материалом до испытания и после испытания до 100 °С смазки Солидол Ж (а) и предлагаемого пластичного смазочного материала (б)

Более того, предлагаемый пластичный смазочный материал Солидол Ж(мод.) сохраняет некоторую смазочную способность при температуре выше 150 °С, прежде чем полностью выгорит при 250 °С (как показано на рис. 4, б).

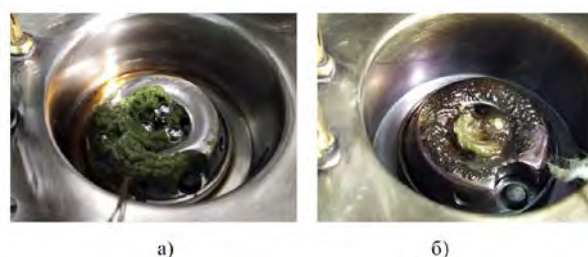


Рис. 4. Фотографии оправки с Солидол Ж(мод.) после температурных испытаний до 160 °С (а) и до 250 °С (б)

На рис. 5 приведены микрофотографии пятен износа при температурных испытаниях Солидола Ж и модифицированной смазки Солидол Ж(мод.) до 100 °С, а также Солидол Ж(мод.) до разных температур в наиболее характерных точках: 100, 160 и 250 °С. Разница по износу в данных условиях испытаний сравниваемых смазочных материалов при испытании до 100 °С (рис. 5, а-б) незначительна, за счёт небольшого пути трения.

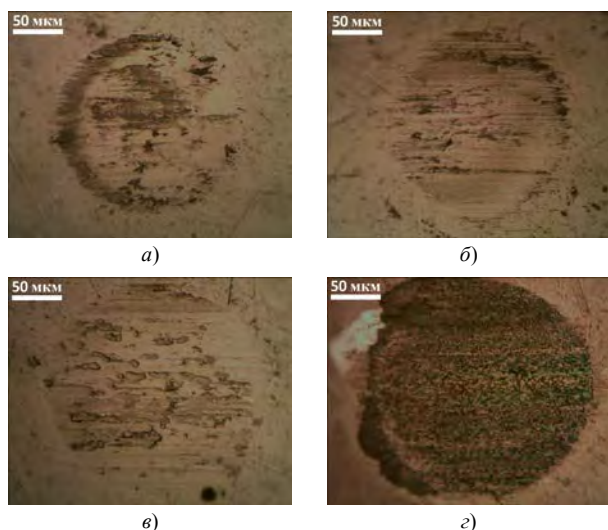


Рис. 5. Пятна износа после температурных испытаний Солидола Ж (а) и Солидол Ж(мод.) (б) до 100 °С и Солидол Ж(мод.) до 160 (в) и 250 °С (г)

С повышением температуры испытаний смазки Солидол Ж(мод.) износ соответственно увеличивается, а также изменяется характер изнашивания (рис. 5, б-г), что отражается в степени повреждения поверхности и образующихся на поверхности плёнках.

Заключение

Таким образом, модифицированный пластичный смазочный материал на основе Солидола Ж и полимочевины обеспечивает снижение диаметра пятна

износа на 33% и допустимый коэффициент трения в более широком диапазоне рабочих температур ($T_{кр}$ увеличена с 70 °С до 130 °С) по сравнению со стандартным пластичным смазочным материалом Солидол Ж. Предлагаемый состав пластичного смазочного материала предполагается использовать для применения в ДСМ в условиях высоких температур и нагрузок во влажных и агрессивных средах, характерных для тропических климатических условий (на примере Вьетнама).

1. Зорин В.А., Ле Чонг Туан Анализ влияния климатических особенностей Вьетнама на работоспособность дорожных машин //Грузовик. – 2019. – №. 9. – С. 18-20.
2. Зорин В.А., Туан Л.Ч. Оценка надежности дорожных машин, работающих в тропических условиях //Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2019. – №. 1. – С. 45-49.
3. Ле Чонг Туан, Зорин В.А., Хазиев А.А. Разработка пластичного смазочного материала для строительных машин, работающих в тропических условиях // Строительные и дорожные машины. – М.: 2021. – № 2. – С. 12-16.
4. Матвеевский Р.М. Лашхи В.Л., Буяновский И.А. и др. Смазочные материалы. Антифрикционные и противоизносные свойства. Методы испытаний: Справочник. – М.: Машиностроение, 1989. – 217 с.
5. Буяновский И.А., Лашхи В.Л., Самусенко В.Д. Развитие температурного метода оценки смазочной способности масел //Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. – 2017. – №. 2. – С. 28-33.
6. Албагачиев А.Ю. и др. Температурная стойкость космических смазок российского производства //Вестник машиностроения. – 2019. – №. 9. – С. 34-36.

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ДЕТАЛЕЙ В МАШИНОСТРОЕНИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ GEOMAGIC CONTROL X

В.В. Зуев, Е.В. Преображенская, А.В. Кислова, М.С. Крештин

Российский технологический университет «МИРЭА», Москва, Россия;

Проведено сканирование и сравнение результатов после него с эталонными данными для того, чтобы понять, насколько точным является объемное сканирование для контроля качества деталей в машиностроении.

Контроль качества (QC) – процесс, с помощью которого производитель обеспечивает улучшение качества продукции или ее сохранение. Для этого контроля устанавливаются контрольные показатели качества и проводится тестирование продукции, чтобы понять отклонения от этих показателей. Данные манипуляции: сопоставление полученных данных и тестирование определяют необходимость какой-либо коррекции в производственном процессе. Одним из важных аспектов контроля качества является использование метрологических средств измерений для стандартизации производственных процессов [1].

Контроль геометрии является частным случаем контроля качества, в котором с помощью различных технических средств проводится измерение размеров, формы исследуемого объекта. С применением специальных метрологических 3D-сканеров позволяет получить изображение каждой точки объекта. На их основе создается очень точная 3D-модель детали, которая затем используется для сравнения с подготовленной эталонной или CAD-моделью.

В сравнении с традиционными методами проверки изделий, автоматизация контроля геометрии позволяет сократить затраты на контроль качества. При помощи современных способов контроля появляется возможность проверять буквально каждую деталь на производстве, тогда как при помощи ручных измерений такая возможность есть только для ограниченного количества деталей, особенно если речь идет о конвейерах.

Некоторые виды контроля вообще невозможно провести традиционными методами. Чтобы оценить износ сложных деталей, к примеру, турбин самолетов, или любой другой сложной техники, которая работает с высокими нагрузками, необходимо сравнение с моделями, которые могут быть в составе коммерческой тайны. Только объемное сканирование может позволить быстро провести необходимые измерения и сразу отправить полученные данные для сравнения или оценки производителям, или экспертам буквально в любую точку мира.

Для контроля геометрии могут использоваться различные методы и типы оборудования:

- ручной обмер;
- оптические 3D-сканеры;
- лазерные 3D-сканеры;
- наземные 3D-сканеры;

- контрольно-измерительные машины (КИМ);

- манипуляторы с сенсорами;
- фотограмметрическое оборудование;
- системы технического зрения.

При использовании для контроля качества и геометрии 3D-сканеров получают более точные данные, чем при традиционных методах контроля, собирается большое количество данных сразу, и сканирование, проведенное для одной детали, может быть автоматически проведено с другими деталями той же серии [1].

Машиностроение является одной из областей применения объемного сканирования. Данная сфера в целом использует большое количество новых технологий, что позволяет сделать производство более быстрым, качественным и современным. Объемное сканирование позволяет решать огромное количество задач в машиностроении.

Однако не каждому производству необходим собственный сканер в постоянном пользовании. В зависимости от частоты использования объемных сканеров на том или ином производстве, есть смысл обращаться к специалистам в области сканирования, особенно, если применять сканеры нужно не очень часто.

Машиностроение – это сложное производство, подразумевающее изготовление большого количества разнообразных узлов и деталей. Они находятся в тесной взаимосвязи, обеспечивая работу механизмов. Поэтому очень важно контролировать соблюдение геометрии, формы и прочих параметров, особенно когда производство только запускается и оборудование проходит настройку. Сканирование позволяет получить цифровую объемную копию детали и проверить все ее части на соответствие модели. Такой контроль качества является наиболее прогрессивным и точным [2].

Одной из программ, используемых для контроля, является Geomagic Control X. Это профессиональное программное обеспечение для трехмерного контроля качества и контроля размеров, собирающее и обрабатывающее данные с 3D-сканеров и других измерительных устройств. Данная программа обеспечивает контроль качества на следующих этапах:

- проектирование;
- производство;
- проверка;

- обслуживание;
- экспорт результатов работы для последующей обработки.

На рисунке 1 показаны загруженные в данную программу эталонная CAD модель и результат 3D-сканирования.

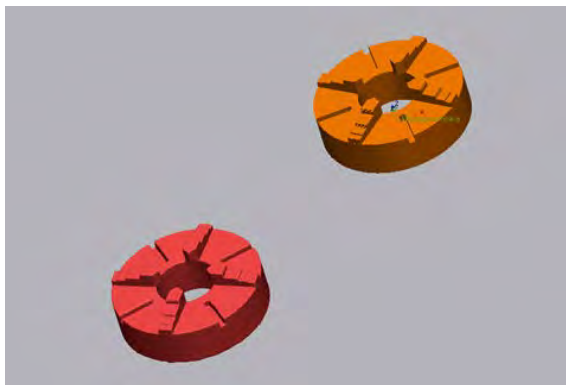


Рисунок 1. Эталонные данные и результаты объемного сканирования, загруженные в Geomagic Control X и подготовленные к совмещению.

В данном программном обеспечении совмещение необходимых данных происходит максимально понятно для любого пользователя: либо алгоритмы программы автоматически совмещают модели по определенным геометрическим особенностям, либо же можно вручную проставить несколько точек на данных, по которым проще всего будет их соединить.

После совмещения доступно включение цветовой карты отклонений. Отображаемая шкала цветов показывает значения отклонений в необходимых единицах. На спектре самые холодные цвета, которые ближе к синему, означают, что полученные после сканирования области на данных немного проседают, то есть находятся ниже эталонных поверхностей, красные же наоборот – данные располагаются выше эталона.

На рисунке 2 показан результат совмещения и отображена цветовая карта отклонений, на которой отмечены некоторые точки для того, чтобы лучше понимать значения отклонений в определенных областях.

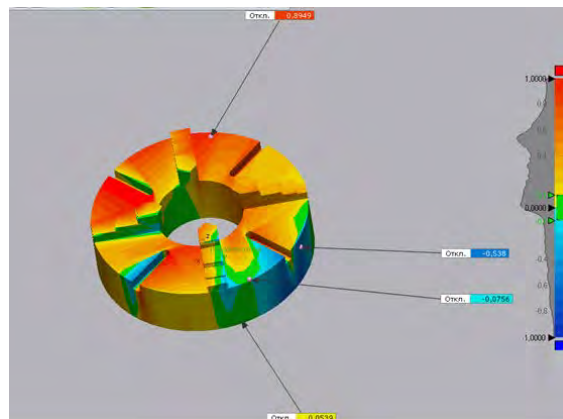


Рисунок 2. Совмещенные результаты сканирования и эталонная CAD модель с отображенной цветовой картой и точками отклонений.

Из рисунка 2 видно, что основная часть данных находится в желтой зоне, это означает, что сканирование проведено достаточно точно и полученные данные могут использоваться в дальнейших процессах.

Если на карте отклонений преобладают синие или красные оттенки, необходимо проводить сканирование заново. Однако, как показывает практика, дополнительные или новые сессии сканирования обычно не нужны, потому как сканеры обеспечивают необходимую точность для сбора данных.

Вывод

Использование объемного сканирования и в частности специального программного обеспечения Geomagic Control X позволило сократить время измерений и вычисления отклонений геометрии готовой детали от эталонной модели.

В проведенном исследовании по цветовой карте отклонений видно, что сканирование оказалось достаточно точным способом сбора данных о геометрии объекта.

1. Kim, H.; Lin, Y.; Tseng, T.-L.B. A review on quality control in additive manufacturing. *Rapid Prototyp. J.* 2018, 24, 645–669..
2. 4. Катунин, Г. П. Основы мультимедийных технологий: учебное пособие / Г. П. Катунин. — Санкт-Петербург: Лань, 2018. — 784 с.

ИНЕРЦИОННАЯ СВАРКА ТРЕНИЕМ РАЗНОРОДНЫХ СТАЛЕЙ И МЕТАЛЛОВ МАЛОГО ДИАМЕТРА

Г.Ю. Иванов, А.Д. Фролов, О.И. Кулаков

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; kulakov@imash.ru

В статье проведен анализ ротационной сварки трением с использованием однородных и неоднородных материалов.

Цель

В современной промышленности до сих пор остро стоит вопрос о способах и методах соединения схожих и, что более важно, несхожих материалов. Сварка трением – это метод соединения материалов, при котором одна деталь (чаще всего цилиндр или труба) вращается вокруг своей оси и с давлением прижимается ко второй детали, которая неподвижно закреплена. При такой сварке материалы не плавятся, а соединение получается полностью гомогенным. Для повышения прочности соединения необходимо подбирать точные параметры, такие как скорость вращения, давление и маховая масса [1-3].

Процесс сварки происходит следующим образом. Одна деталь разгоняется до нужной скорости и прижимается к неподвижной второй детали. Через несколько секунд обе детали начинают пластически деформироваться. В зоне контакта металл начинает равномерно выдавливаться по всей окружности шва. Затем происходит резкая остановка вращения. Металл охлаждается и получается гомогенное соединение между двумя деталями [4].

Инерционная сварка трением это подвид сварки трением при котором остановка вращения происходит за счет затвердевания металла самой полученной заготовки, а не ручной (или программной) остановки станка. Этот способ является одним из самых простых и малозатратных видов сварки трением [3].

Однако, данный метод является наиболее чувствительным к выбранным параметрам. При других методах сварки трением скорость вращения и давление можно немного завысить и это не отразится на качестве сварки. При инерционной сварке если скорость или давление установлены выше нормы, то сварка не происходит вовсе.

Так же при инерционной сварке особую роль играет маховая масса. При сварке металлов крупного диаметра (более 100 мм) из-за большей свариваемой площади роль маховой массы отчасти передается на сами детали. И как только металл остывает, образуя соединение, его силы хватает чтобы погасить всю инерцию вращения. При сварке деталей малого диаметра недостаток маховой массы приведет к ранней остановке вращения, тем самым нужная температура деформации не будет достигнута. При избытке маховой массы малая площадь соединения не способна остановить инерцию вращения, что приводит к разрыву соединения [5].

Поэтому основной целью данной работы является нахождение оптимальных параметров для каче-

ственной инерционной сварки металлов малого диаметра.

Материалы и методы

В исследовании были использованы следующие металлы: Ст3, Ст45, алюминий, медь. Все образцы имели форму цилиндра диаметром 10 мм.

Как представлено на рис. 1 один образец закреплялся на вращающемся валу, другой, параллельно первому, в держателе.

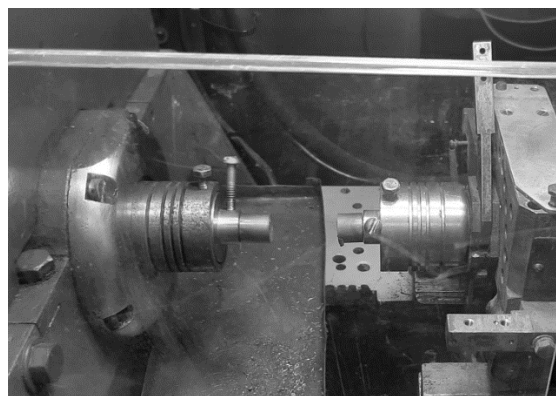


Рис. 1. Образцы на валу (слева) и в держателе (справа)

Далее держатель подвигался к валу так, чтобы между двумя деталями был небольшой зазор (1-2 мм). После устанавливался параметр давления, с которым держатель будет давить на вал. Следующим шагом являлся разгон вала до нужной скорости. Как только нужная скорость была достигнута вал отключался от двигателя и начинал вращаться по инерции. В это же момент держатель начинал давить на вал как показано на рис. 2.

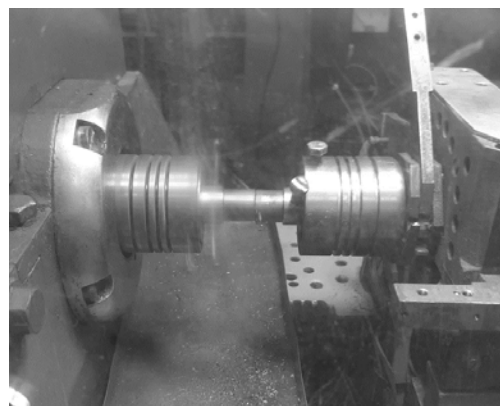


Рис. 2. Держатель давит на вращающийся вал

Металлы под действием трения начинали греться и деформироваться. После того как образовывалось соединение металл остывал и вращение резко останавливалось.

Результаты и их обсуждение

При испытаниях были найдены оптимальные параметры для материалов указанных в табл. 1.

Таблица 1. Пары материалов с определенными оптимальными параметрами

	Ст3	Ст45	Al	Cu
Ст3	+	+	-	-
Ст45	+	+	-	-
Al	-	-	+	+
Cu	-	-	+	+

Примечание. (+) параметры определены, (-) параметры не определены.

Сталь оказалась наиболее податливой. Для обоих видов стали подошли одни и те же параметры, что при соединении их между собой (Ст3-Ст3, Ст45-Ст45), что друг с другом (Ст3-Ст45). Сваренные образцы показаны на рис. 3.



Рис. 3. Сваренные детали. Ст3-Ст3 (слева), Ст3-Ст45 (справа)

Для алюминия, из-за более высокой теплопроводности и малой прочности приходилось понижать давление, сбрасывать маховые массы, но повышать скорость. На рис. 4 показан разлом алюминиевого образца при испытании с избыточным давлением.

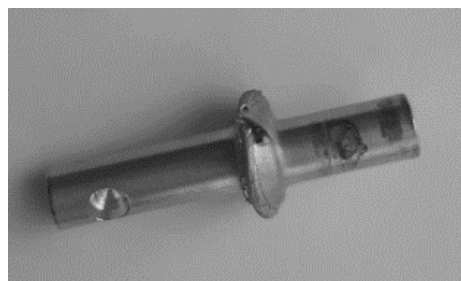


Рис. 4. Разлом алюминиевого образца

Для меди из-за самой высокой теплопроводности (по сравнению с другими образцами) скорость была вновь увеличена, а маховые массы и давление выпали в диапазоне между сталью и алюминием. На рис. 5 показан неудачный образец. Сварка произо-

шла, но маховые массы были подобраны неправильно и образец разорвался.



Рис. 4. Разорвавшийся медный образец из-за излишней маховой массы

Сложнее всего далась сварка меди и алюминия. Данные параметры требовали более тонкой подбора. Все найденные параметры занесены в табл. 2.

Таблица 2. Параметры сварки трением

Свариваемые металлы	Скорость вращения, пов./мин	Давление, кгс	Маховая масса, кг·м ²
Стали	3500	5	15
Al - Al	4500	3	5
Cu - Cu	5500	4	8
Al - Cu	5500	3,5	7

В данном исследовании были найдены не все оптимальные параметры, например, как для сварки стали с алюминием или с медью. Но все параметры занесенные в табл. 2 ведут к получению качественного сварного соединения при использовании инерционной сварки трением.

1. Switzner, N.T. & Yu, Z. & Eff, Michael & Lienert, Tom & Fonseca, A. (2018). Microstructure and mechanical property variations within inertia friction-welded joints of stainless steel to steel: Within-joint microstructure and mechanical property distributions must be considered when designing novel applications for dissimilar friction welding. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 10.1007/s00170-017-1568-3.
2. A. Seshu Kumar, Sk. Abdul Khadeer, V. Rajinikanth, Santanu Pahari, B. Ravi Kumar, Evaluation of bond interface characteristics of rotary friction welded carbon steel to low alloy steel pipe joints, Materials Science and Engineering: A, Volume 824, 2021, 141844, ISSN 0921-5093
3. Sanjeev Verma, Vinod Kumar, Raman Kumar, Ramandeep Singh Sidhu, Exploring the application domain of friction stir welding in aluminum and other alloys, Materials Today: Proceedings, 2021, ISSN 2214-7853
4. Feng Jin, Jinglong Li, Pu Liu, Xujing Nan, Xun Li, Jiangtao Xiong, Fusheng Zhang, Friction coefficient model and joint formation in rotary friction welding, Journal of Manufacturing Processes, Volume 46, 2019, Pages 286-297, ISSN 1526-6125
5. Neeraja Pilli, Ajit Kumar Senapati, and Swarna Latha Moora, "Review on process parameters of similar and dissimilar materials in friction welding", AIP Conference Proceedings 2327, 020049 (2021)

АКТИВНЫЙ КОНИЧЕСКИЙ ПОДШИПНИК ЖИДКОСТНОГО ТРЕНИЯ С РЕГУЛИРУЕМЫМ СРЕДНИМ ЗАЗОРОМ

Ю.Н. Казаков, А.В. Корнаев, Д.В. Шутин, Л.А. Савин

Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева, Орел, Россия; KazakYurii@yandex.ru

В работе представлены теоретические исследования в области управляемых опор жидкостного трения. Предложена концепция подшипника с изменяемой геометрией смазочного слоя, а также рассмотрены несколько типов регуляторов для управления.

Сегодня большое распространение в области исследования управляемых опор жидкостного трения получили опоры с изменяемой геометрией. Использование таких подшипников позволяет решать ряд проблем: уменьшение амплитуд колебаний ротора, уменьшение момента трения [1,2]. Зачастую концепция таких опор включает в себя встраиваемые элементы, с помощью которых осуществляется управление геометрией смазочного слоя [3-6].

В работе предложена концепция управляемой опоры жидкостного трения с использованием конического подшипника (рис. 1). Опора состоит из конической втулки и вала с конусом. В результате имеется возможность регулировать величину среднего зазора за счет осевого смещения вала во втулке.

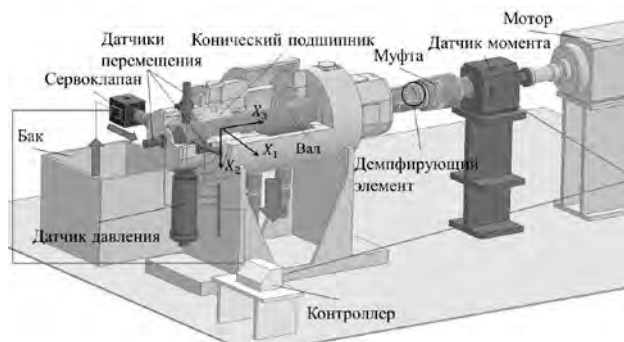


Рис. 1. Концепция конической опоры с изменяемой геометрией

Осевое смещение вала обеспечено за счет использования подвижной муфты. В муфту встроен демпфирующий элемент, который регулирует величину смещения. Используется осевая подача жидкости. Это позволяет создавать осевую силу за счет статического давления на торец вала. Изменение величины подачи жидкости осуществляется за

$$h^3 \frac{\partial}{\partial \beta_1} \left(\beta_1 \frac{\partial p}{\partial \beta_1} \right) + \frac{1}{\beta_1} \frac{\partial}{\partial \beta_2} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial \beta_2} \right) = 6(\mu_1 h + \mu_2 \frac{\partial h}{\partial \beta_2} - 2\mu_3 \beta_2). \quad (1)$$

В результате решения уравнения (1) были получены траектории движения ротора в конической опоре жидкостного трения. Ротор обладает массой 1 кг, скорость вращения 3000 об/мин. После были подобраны оптимальные параметры конусности подшипникового узла, коэффициентов жесткости и

счет регулирования сервоклапаном.

Состояние узла контролируется рядом датчиков. Встроенные датчики перемещения осуществляют контроль над колебаниями вала в трех координатных осях. Давление подачи жидкости контролируется датчиком давления. Для получения сведений о создаваемом моменте трения используется датчик момента.

В работе рассматриваются теоретические исследования предложенной концепции подшипникового узла. Для разработки математической модели объекта использовался программный комплекс Matlab&Simulink. Была разработана 3D модель вала и перемещена в среду Simulink. Особенностью такого моделирования является то, что динамика ротора рассматривается как динамика твердого тела а не материальной точки, что приближает модель к реальной [7].

Для вычисления реакций смазочного слоя и момента трения было получено и решено уравнение Рейнольдса в цилиндрических координатах для конического подшипника (1).

Модель состоит из муфты, которая передает вращающий момент на вал массой 1 кг, скорость вращения равна 3000 об/мин. Вал может перемещаться в муфте в осевом направлении. Справа вал размещен в конической опоре жидкостного трения, в которой вращается под действием сил реакции смазочного слоя, дисбаланса, собственного веса.

Такая модель включает в себя блоки деталей, которые обладают свойствами близкими к реальным. Блоки соединены между собой различными связями и взаимодействуют за счет силы и момента. Силы реакции смазочного слоя и момент трения определяются искусственными нейронными сетями. Осевая сила, дисбаланс, сила реакции муфты задаются формульно.

демпфирования муфты, а также выбран рабочий диапазон давления жидкости в смазочном узле. Параметры были подобраны таким образом, чтобы при максимальном давлении подачи осевое смещение ротора было не больше чем на 2 мм. Подобранные параметры: $K=8000$, $B=20$, $\alpha=1.145$ град.,

рабочий диапазон давления составил от $1.05 \cdot 10^5$ Па до $1.1 \cdot 10^5$ Па.

Функцию сил реакции смазочного слоя, а также момента трения можно представить как функцию, зависящую от параметров: $X_1, X_2, X_3, V_1, V_2, V_3, p$. X_1, X_2, X_3 – координаты вала в подшипнике в соответствие с осями координат, V_1, V_2, V_3 – скорости движения в тех же осях, p – давление подачи жидкости. Искусственные нейронные сети показывают хорошие результаты в аппроксимации функций. Поэтому была сформирована выборка данных входных параметров массивом 229456×7 , и выходных параметров для сил массивом 229456×3 , и для момента трения 229456×1 . В данной выборке номер строки соответствует случаю, а столбец входному или выходному параметру. Дата сет формировался из набора данных моделирования траекторий для случаев с разным давлением подачи от $1.05 \cdot 10^5$ Па до $1.1 \cdot 10^5$ Па с шагом $0.01 \cdot 10^5$ Па, время моделирования составило 1,5 с. После формирования выборки используя встроенный инструмент Matlab «nnstart» для аппроксимации данных были обучены 2 нейронные сети для сил реакции смазочного слоя и для момента трения соответственно [10].

Входные параметры сети: $X_1, X_2, X_3, V_1, V_2, V_3, p$, выходные параметры первой сети являются силы реакции смазочного слоя: F_1, F_2, F_3 , второй сети момент трения: M . Сравнительные результаты аппроксимации путем использования искусственных нейронных сетей и решения уравнения Рейнольдса в области обучения погрешность составила менее 1%. Вне области обучения ИНС погрешность для положения ротора составила 3.5%, а для момента 3%, однако возрастает с увеличением осевого смещения ротора.

Для управления опорой использовалось несколько моделей контроллеров: ПИ-контроллер, адаптивный ПИ-контроллер, DQN-агент [8].

Задачей системы управления была минимизация момента трения во времени. ПИ- и адаптивный ПИ-регуляторы для всех задач имели одинаковые настройки системы. Коэффициенты ПИ-регулятора:

$P=100, I=4000$. Коэффициенты адаптивного ПИ-регулятора: $P=100, I=400$. Частота управления регуляторов 10 сиг./с. Максимально допустимая величина выходного сигнала адаптивного ПИ-регулятора $L_{\max}=9000$. При настройке агента для решения этой задачи была выбрана граница момента трения, а от системы требовалось минимизировать момент ниже этой границы. Значение границы составило 0.0043 Н·м. Функция награды агента состоит из условий и является дискретной: если агент держит момент трения ниже границы, то получает награду в размере +1, а если момент трения выше то награда +0. Также на систему наложены ограничения в виде системы прерывания, которая при срабатывании накладывает штраф в виде отрицательной награды. Значение награды равно -30. Условия прерывания: осевое смещение больше 2 мм, ротор попал в зону слабой гидродинамики, управление совершено дольше, чем за 1 сек. В данной постановке задачи агент на наблюдение получает 7 параметров: $X_1, X_2, X_3, V_1, V_2, V_3, \Delta M$. Где ΔM разница между уставкой и действующим моментом трения.

Параметры агента:

- Число итераций: 5000;
- Время моделирования: 4 с.;
- Частота управляющих сигналов: 10 Гц;
- Количество нейронов в искусственной нейронной сети: [14, 18, 18];
- LearnRate: 0.001;
- ExperienceBufferLength: 100000;
- DiscountFactor: 0.85;
- MiniBatchSize: 250;

Агенту удалось обучиться быстрее максимального количества итераций: 3420. Результаты управления при решении этой задачи для всех видов используемых контроллеров представлены в табл. 1.

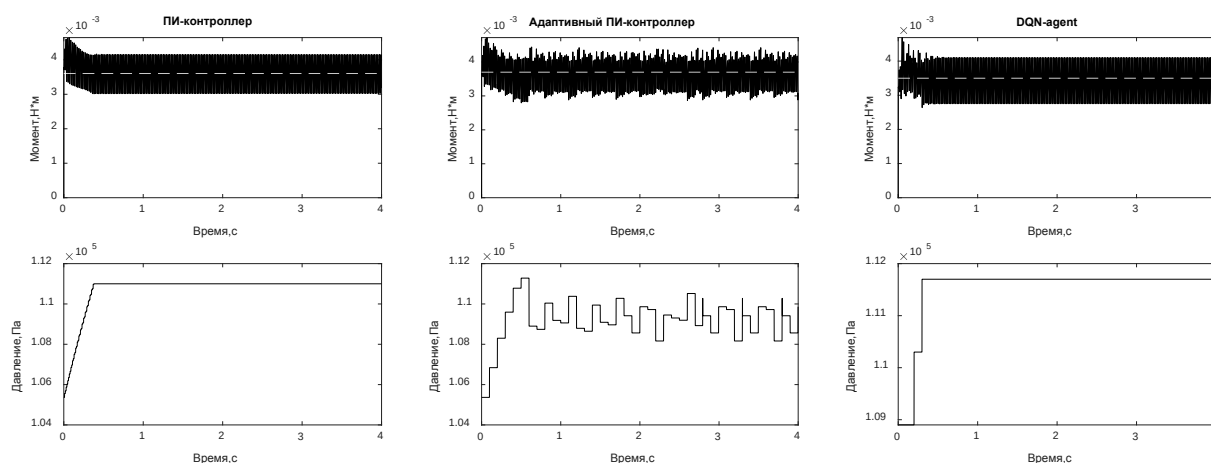


Рис. 2 – Значение момента трения в соответствие с управляющим воздействием контроллеров

Таблица 1. Результаты управления при решении задачи с воздействием силы

	RMS (Н·м)	Амплитуда (Н·м)	Время пере- ходного про- цесса (с)
Без управления	0.0041	0.0012	-
ПИ-контроллер	0.0036	0.00143	0.41
Адаптивный ПИ-контроллер	0.0037	0.0014	0.5
DQN-agent	0.0035	0.0015	0.3

Из табл. 1 видно, что наименьшее значение момента трения достигается регулятором, основанным на методах глубокого обучения. Также этот регулятор имеет меньшее время регулирования по сравнению с другими регуляторами. Наименьшая амплитуда колебаний момента трения характерна для случая Adaptive PI controller.

На рис. 2 представлены графики изменения момента в соответствие с управляющим воздействием регуляторов. На графике управляющего сигнала адаптивного ПИ-регулятора видны импульсные воздействия, как описано в разделе 3.3. Что касается ПИ-регулятора и DQN-agentа то для них характерны постепенное возрастание управляющего сигнала до наилучшего значения.

1. Ł. Breńkacz, Ł. Witanowski, M. Drosińska-Komor, and N. Szewczuk-Krypa Research and applications of active bearings: A state-of-the-art review/ Ł. Breńkacz, Ł. Witanowski, M. Drosińska-Komor, and N. Szewczuk-Krypa // Mech. Syst. Signal Process.- 2021. vol. 151, doi: 10.1016/j.ymssp.2020.107423.
2. F. Qin, Y. Li, H. Qi, and L. Ju Advances in compact manufacturing for shape and performance controllability of large-scale components-a review / F. Qin, Y. Li, H. Qi, and L. Ju // Chinese J. Mech. Eng. (English Ed., vol. 30, no. 1, pp. 7–21) -2017. doi: 10.3901/CJME.2016.1102.128.
3. A. Chasalevris and F. Dohnal Improving stability and operation of turbine rotors using adjustable journal bearings / A. Chasalevris and F. Dohnal // Tribol. Int.-2016. vol. 104, pp. 369–382, doi: 10.1016/j.triboint.2016.06.022.
4. A. Chasalevris and F. Dohnal Modal interaction and vibration suppression in industrial turbines using adjustable journal bearings/ A. Chasalevris and F. Dohnal // J. Phys. Conf. Ser.- 2016. vol. 744, no. 1, doi: 10.1088/1742-6596/744/1/012156.
5. R. Pai and D. W. Parkins Performance characteristics of an innovative journal bearing with adjustable bearing elements / R. Pai and D. W. Parkins // J. Tribol. - 2018. vol. 140, no. 4, doi: 10.1115/1.4039134.
6. G. J. Davies GT2004-54322 popularly used active devices for vibration control in rotating / G. J. Davies // Analysis.-2004. pp. 1–10
7. smimport //MathWorks. Help Center [сайт].-URL <https://www.mathworks.com/help/physmod/sm/ref/smimport.html> (дата обращения 23.06.2021)
8. RL Agent //MathWorks. Help Center [сайт].-URL <https://www.mathworks.com/help/reinforcement-learning/ref/rlagent.html> (дата обращения 23.06.2021)

ПОВЫШЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ

В.И. Калита, Д.И. Комлев, А.А. Радюк, В.Ф. Шамрай, А.Б. Михайлова
А.В., Алпатов, Д.Д. Титов

Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва, Россия.
vkalita@imet.ac.ru

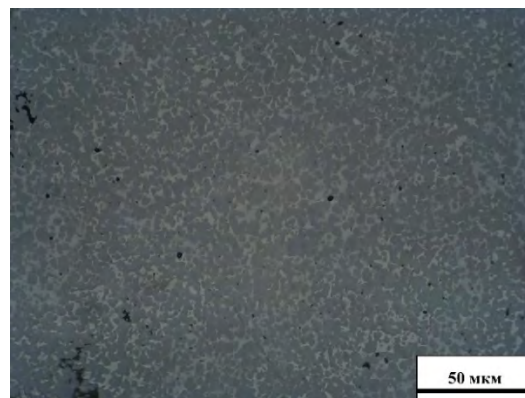
Повышение механических свойств плазменных покрытий выполнено за счет оптимизации трех научных направлений: химического состава напыляемого порошка, процесса напыления и последующей термопластической обработки.

Медленно, но верно мы приближаемся к повышению механических свойств газотермических покрытий. Часть таких исследований посвящена структуре и механическим свойствам покрытий непосредственно при плазменном напылении. Наиболее востребованные являются износостойкие покрытия. Наилучшими свойствами обладают WC-Co покрытия. Низкая энергия образования WC карбида определяет его относительно высокие пластические свойства, по сравнению с TiC карбидом, который имеет более высокую твердость. Низкая энергия образования WC карбида приводит к высоким степеням его растворения, до 80%, в жидкой фазе WC-Co при температуре, до 2000 °С, которая реализуется при плазменном напылении, что приводит к снижению пластических свойств этого покрытия.

Последние годы лаборатория сосредоточилась на керметах, упрочненных TiC карбидами. При решении этой задачи учитывали особенности физико - механических свойств TiC карбидов, плазменного напыления и способов получения керметных порошков для напыления. Повышение механических свойств кермета на основе TiC карбида реализуем за счет дополнительного упрочнения его карбидами с низкой энергией образования, это карбиды на основе W, Cr и Mo. При плазменном напылении карбиды этих металлов растворяются в жидкой фазе на основе Co и при затвердевании частиц на подложке кристаллизуются в виде кольцевой зоны на поверхности TiC карбида, который растворяется в жидкой фазе при плазменном напылении не более чем на 10%. Формирование кольцевой зоны повышает механические свойства кермета за счет большей пластичности по сравнению с TiC карбидом. Механические свойства кермета повышаются и за счет формирования более прочной связи кольцевой зоны с матричной и карбидной фазами.

В работе исследовали композиционный материал следующего состава: 45%TiC – 5%WC –

10%Cr₃C₂ – 26,2%(Ni-20%Cr) – 11%Mo – 2,8%C [1]. Дополнительный углерод был введен для компенсации его потерь на стадиях изготовления порошка и плазменного напыления. Смесь исходных порошков прессовали при комнатной температуре при удельном давлении 30 кГ/мм², прессовку спекали в вакууме при температуре 1400 °С в течение 1 часа. Спек размалывали в порошок для напыления, который рассеивали на ситах для получения фракции 32-71 мкм. Покрытия напыляли на универсальной плазменной установке УПУ-3д стандартным плазмотроном марки ПП-25 с диаметром сопла анода 6 мм. Мощность плазмотрона (плазменной струи) повышали увеличением содержания азота в составе плазмообразующего газа, основу которого составлял аргон. Водоохлаждаемую насадку к плазмотрону с длиной равной дистанции напыления, 170 мм, использовали для местной защиты напыляемого порошка от атмосферы воздуха. Покрытия из порошка исследуемого состава имеют однородную структуру (Рис.1.) Исходный порошок для напыления имел твердость: 15,9 ± 1,12 ГПа при нагрузке на индентор 200 Г и 27,3 ± 4,42 ГПа при нагрузке 20 Г. Максимальные значения микротвердости в покрытии при 200 Г выше 16,8 ± 2,01 ГПа, при 20 Г немного ниже 24,7 ± 3,38 ГПа, эти значения выше микротвердости WC-Co покрытий.



(а)

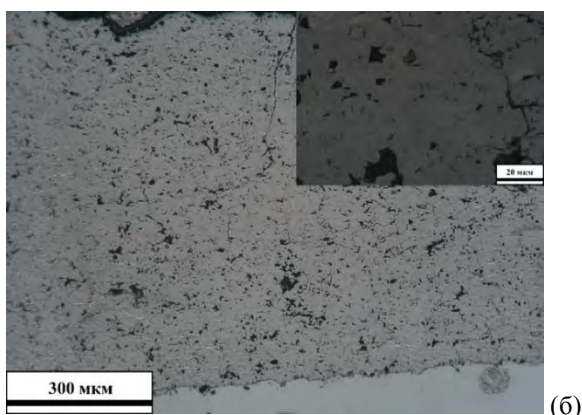


Рис.1. Микроструктура (а) порошка для напыления и (б) – покрытия, напыленного при $Nef=18\text{кВт}$

О формировании кольцевой зоны вокруг исходных TiC карбидов можно судить по формированию сложных карбидов $TiC_xMe_{(1-x)}$, имеющих меньший период решетки чем у TiC карбида, рентгеновский луч сначала проходит через кольцевую зону NiCrMoTiC, имеющую меньший период решетки, и только потом взаимодействует с TiC карбидом (рис.2).

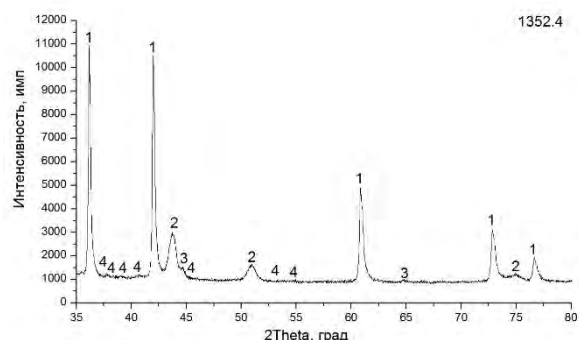


Рис. 2. Рентгенограмма образца покрытия. Цифрами помечены фазы, присутствующие в образце: 1- $TiC_xMe_{(1-x)}$, 2- твердый раствор на основе никеля (CrNi), 3- твердый раствор на основе хрома $Cr_{0.8}Ni_{0.2}$, 4- карбиды хрома (Cr_2C_3 , Cr_7C_3).

Одной из основных причин снижения механических свойств газотермических покрытий является наличие неоднородностей, чаще всего в виде включений оксидов, на границах между напыленными частицами (Рис.3). После напыления мы имеем покрытия, которые по своим свойствам являются изделиями аналогичными тем, которые получаются при традиционной порошковой металлургии. Такие изделия формируются из порошков, поверхность которых изначально покрыта оксидом. Его присутствие в материале готовых изделий является фактором, снижающим их прочностные свойства. При плазменном напылении расплавленные напыляемые частицы окисляются как во время полета, так и при деформации на подложке.

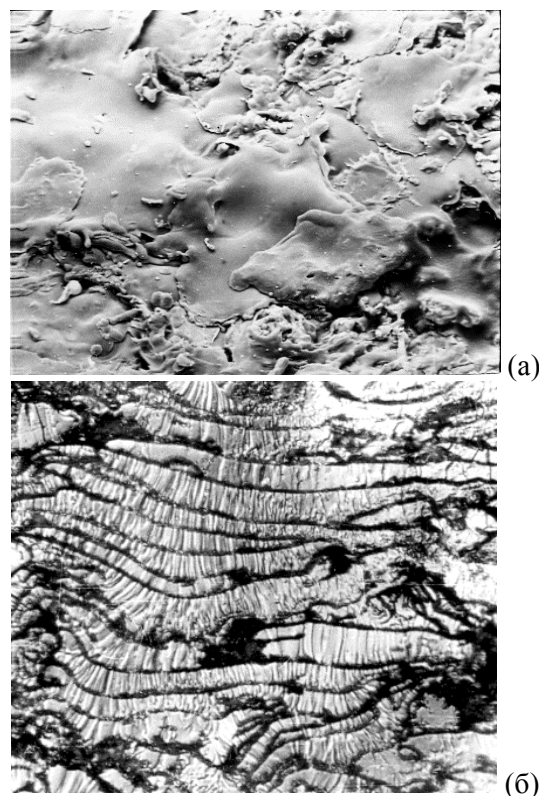


Рис. 3. Плазменное алюминиевое покрытие в состоянии после напыления: (а) – вид сверху, (б) – шлиф, поперечное сечение, перпендикулярное подложке.

Сформированные металлические плазменные покрытия состоят из дискообразных частиц толщиной 6 мкм, поверхность которых покрыта оксидом, между этими частицами расположены линзовидные трещины, действующие при растяжении покрытия как трещины Гриффитса. Все газотермические покрытия, отделенные от подложки, при растяжении деформируются в упругой области и разрушаются при начале пластических деформаций. Более того, и в упругой области модуль упругости составляет не более 25% от модуля упругости монолитного материала даже при пористости 4%, что определяется малым процентом прочной связи между напыленными частицами. Повышение механических свойств газотермических покрытий возможно при их последующей термопластической обработке. ИМЕТ РАН предложил ВГТУ обработку плазменных покрытий электромеханической обработкой (ЭМО) (Рис.4) [2]. После ЭМО микротвердость покрытий достигает своих предельных значений, реализуемых в объемных керметах и чугунах, но процент прочной связи не превышает 50%. Такой результат объясняется негативным влиянием исходных оксидов на поверхности напыленных частиц, которые при нагружении сжатия имеют низкую степень

деформации, и не происходит разрушения сплошной оксидной пленки, необходимого для формирования прочной связи между отдельными частицами на ювенильных поверхностях.

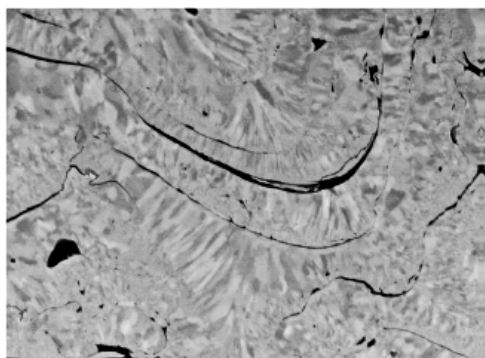


Рис. 4. Поперечное сечение никелевого покрытия после электромеханической обработки (ЭМО).

Наши исследования этого года были направлены на дальнейшую интенсификацию процесса термопластической обработки плазменных покрытий. За счет повышения степени пластической деформации никелевого

покрытия при более высоких температурах и времени процесса достигнуто разрушение структуры покрытия в виде затвердевших на подложке в виде дисков напыленных частиц (рис. 5).

В настоящее время проводятся исследование покрытий из керметов WC-12%Co и TiC-FeNiMo, высоко легированного сплава эвтектического состава Fe основа – 32%Cr - 1,9%Mn - 3,8%C - 2,2%Si - 2,2%B, быстрорежущей стали марки 10P6M5 и аустенитной стали 0,5%C - 24,3%Cr -10,4%Mn - 3,2%Ni - 0,5%Si и Ni, как модельного материала.

1. Калита, В. И., Радюк, А. А., Комлев, Д. И., Михайлова, А. Б., Алпатов, А. В., Титов, Д. Д. Керметные плазменные покрытия TiC – Cr₃C₂ – WC – NiCr – Mo – C // Перспективные материалы. – 2021. – №. 6. – С. 29-39.
2. Ivannikov, A. Y., Kalita, V. I., Komlev, D. I., Radyuk, A. A., Mikhailova, A. B., Alpatov, A. V., ... & Goldberg, M. A.I. Investigation into improving microstructure and properties of plasma sprayed Ni coating via electromechanical treatment // Journal of Materials Processing Technology. – 2019. – Т. 266. – С. 442-449.

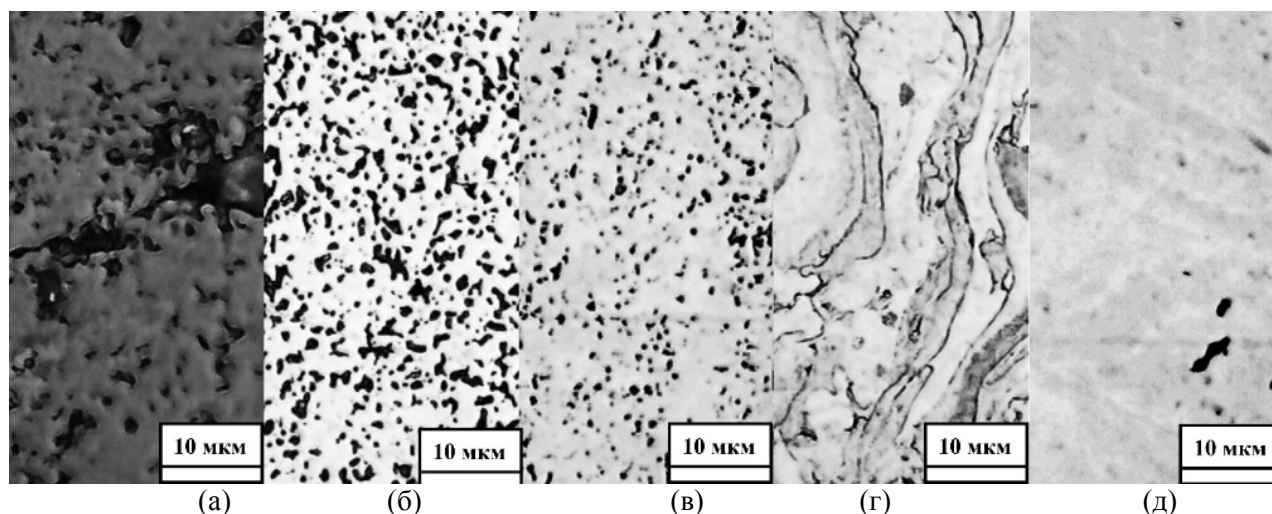


Рис. 5. Зоны микроструктуры плазменных никелевых покрытий после термопластической обработки при температуре до 1200 °С: (а) – зона с оксидом на свободной поверхности, (б) и (в) – зоны с дисперсным оксидом, (г) – структура покрытия в состоянии после плазменного напыления, (д) – однофазная зона около подложки.

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНАШИВАНИЯ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ ШАРНИРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

В.В. Капустин, Е.А. Памфилов

Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия

Исследованиям изнашивания подвергались антифрикционные композиционные материалы на основе политетрафторэтилена, для чего оценивались сопротивляемость изнашиванию и реализующийся в процессе фрикционного взаимодействия коэффициент трения. Установлены зависимости износа и коэффициента трения исследуемых материалов от значений предложенного обобщённого показателя твёрдости. При этом предложенный антифрикционный материал обладает высоким триботехническими свойствами.

Исследованиям в условиях постоянного нагружения подвергались образцы созданные на основе политетрафторэтилена. При этом оценивались сопротивляемость изнашиванию и реализующийся в процессе фрикционного взаимодействия коэффициент трения композиционных полимерных материалов, характеризующихся приведённым ниже структурным составом. Таким образом исследуемый материал представлял собой политетрафторэтиленовую основу, включающую в себя 1-3% дисульфида молибдена, 2-6% скрытокристаллического графита (СГ) и 15-20% легкоплавкого материала (ЛМ), заключённого в тонкостенные капсулы различной формы и дисперсности. Материал создавался применительно к конструкциям подшипников скольжения шарнирного соединения манипуляторов технологических машин.

Предложенный материал обладает низким коэффициентом трения, способностью к самосмазыванию, задиростойкостью, коррозионной стойкостью и пластичностью. Его компоненты не шаржируются в поверхностный слой контртела, а использование в качестве модификатора дисульфида молибдена и скрытокристаллического графита способствует оптимизации триботехнических свойств антифрикционного материала и уменьшает потери на трение [1].

Для повышения теплофизических параметров материала использовался теплоаккумулирующий эффект, при реализации которого происходит аккумулярование тепловой энергии его структурными составляющими, выполненный в виде капсул с легкоплавким материалом. Теплопоглощение в нём происходит при плавлении легкоплавких материалов, заключённых в тонкостенные капсулы. В результате наблюдается улучшение теплофизических свойств, создаваемых антифрикционных композиционных материалов. В результате тепло, выделяющееся при трении не только отводится металлическими включениями вследствие их высокой теплопроводности, но и расходуется на плавление легкоплавкого содержимого металлических капсул, что препятствует дальнейшему увеличению

температуры материала и снижает тепловую нагрузку узлов скольжения [2].

Оболочки капсул с легкоплавким материалом рекомендуется выполнять из металла с высокой теплопроводностью, например, из меди или латуни в форме сферы, эллипсоида или цилиндра с коническими основаниями и др.

Температура плавления $T_{пл}$ легкоплавкого материала теплопоглощающих элементов задается в пределах от 80 до 140°C. Например, в качестве наполнителей могут использоваться чистые материалы или сплавы, содержащие висмут 35,3%, кадмий 9,5%, свинец 35,1%, олово 20,1% ($T_{пл}=80^{\circ}\text{C}$) или сплав Розе, содержащий висмут 50%, олово 25%, свинец 25% - ($T_{пл}=90^{\circ}\text{C}$), или сплав, содержащий висмут 28,5%, олово 28,5%, свинец 43% - ($T_{пл}=132^{\circ}\text{C}$).

Фотографии капсул с легкоплавким материалом приведены на рисунке 1.

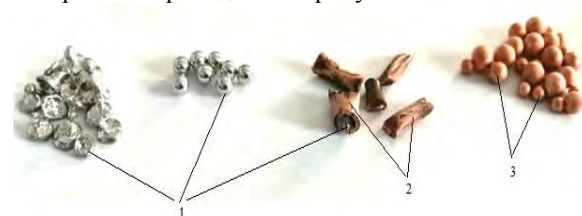


Рисунок 1 – Элементы металлической фазы нового композиционного материала: 1- легкоплавкий материал; 2- капсулы в виде цилиндра, изготовленные путём деформации; 3 – сферические капсулы, заключённые в оболочку, выполненную электрохимическим способом.

Зафиксировано, что для получения достоверных результатов показателей изнашивания исследуемых материалов достаточной является продолжительность их испытаний в течении 120-150 минут, которая и задавалась во всех сериях исследований.

В экспериментах использовались изнашивающие диски (контробразцы), изготовленные из стали 45 твердостью HRC 40-42. Рабочая поверхность диска периодически шлифовалась для возобновления исходной шероховатости Ra 0,16-0,32 мкм. Максимальное значение силы при испытаниях принимались равным 50 Н.

Испытания на износ осуществлялись абразивно-масляной прослойкой по схеме, приведённой на рисунке 2.



Рисунок 2 - Схема испытаний на изнашивание в условиях трения скольжения: 1- исследуемый образец; 2- контрольный образец.

Показатели для оценки сопротивляемости исследуемых материалов изнашиванию была принята величина линейного износа образцов, достигаемого за принятый промежуток времени испытаний. Одновременно оценивался реализующейся при этом коэффициент трения. Величина износа оценивалась по изменению линейных размеров исследуемых образцов и устанавливалась с использованием метода искусственных баз и профилографирования.

Экспериментально установлено, что при изнашивании композиционных материалов на основе политетрафторэтилена абразивно-масляной прослойкой при постоянной нагрузке, процесс поверхностного разрушения происходит вследствие молекулярно- механического и, в меньшей степени, усталостного изнашивания. При этом интенсивность изнашивания при таком характере нагружения увеличивается за счёт влияния подповерхностных трещин, которые образуются и развиваются в исследуемом образце под влиянием частиц абразива, попадающих на контактную поверхность образца.

Влияние твёрдости материала на его износостойкость оценивается чаще всего с использованием метода Бринелля, Роквелла и Виккерса, что является не вполне корректным, особенно, для гетерогенных материалов. Для устранения этого недостатка нами был предложен более информативный обобщённый показатель твёрдости [3], дифференцированно учитывающий роль отдельных структурных составляющих исследуемого материала.

Показатели твёрдости исследуемых образцов и соответствующими им значения износа и коэффициента трения приведены в

таблице 1. Для сравнения в ней же представлены те же самые показатели известных композитов Ф4К20 и Ф4С15 [1].

Таблица 1- Показатели твёрдости исследуемых образцов и соответствующей ей значения износа и коэффициента трения.

Номера опытов и соответствующие им содержание структурных составляющих образцов исследуемого материала.					Твёрдость, НВ	Обобщённый показатель твёрдости	Износ, мкм	Коэффициент трения, <i>f</i>
Номер опыта	Содержание, %							
	ПТФЭ	MoS ₂	СГ	ЛМ				
1.	82	1	2	15	45	41	35	0,082
2.	76	3	6	15	50	47	32	0,090
3.	82	1	2	15	46	42	34,5	0,070
4.	76	3	6	15	51	46	31	0,080
5	76	1	2	21	55	54	33	0,085
6	70	3	6	21	65	58	31,5	0,078
7	76	1	2	21	57	53	34	0,080
8	70	3	6	21	66	58	31	0,090
Материалы для сравнения								
Ф4К20	Ф-4+20% кокса				45	—	—	0,08
Ф4С15	Ф-4+15% стекловолокна				55	—	—	0,09
Ф4К15М5	Ф-4+15% кокса и 5% MoS ₂				49	—	—	0,1

Приведенные в таблице результаты показывают, что исследуемые антифрикционные композиционные материалы имеет износ в пределах 31-35 мкм, а коэффициент трения составляет 0,07-0,09. Также отмечается, что величина износа и коэффициента трения рассматриваемых образцов изменяется в небольших пределах и определяются наличием в материале наполнителей, преимущественно их объёмом, химическим составом и дисперсностью смазочной составляющей- скрытокристаллическим графитом и дисульфидом молибдена. Велика роль и капсул с легкоплавким материалом опосредованно влияющих и на твёрдость композита. Одновременно вместе с тем отмечено, что получаемые показатели отличаются значительным разбросом экспериментальных результатов.

Вместе с тем в гораздо в большей степени наблюдается стабильность получаемых результатов при использовании предложенного нами обобщённого показателя твёрдости, как на величину износа, так и на коэффициент трения исследуемого материала. Отражающие это влияние зависимости приведены на рисунках 3 и 4.

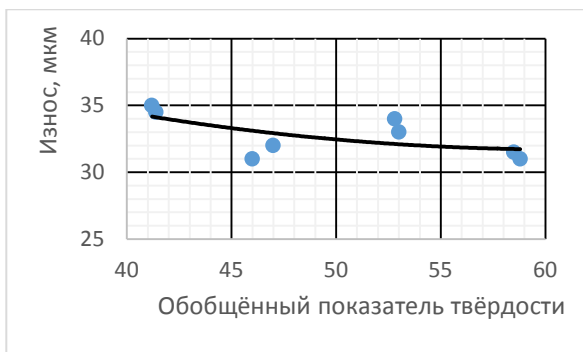


Рисунок 3 - Зависимость износа образцов, выполненных на основе ПТФЭ от обобщенного показателя твердости.

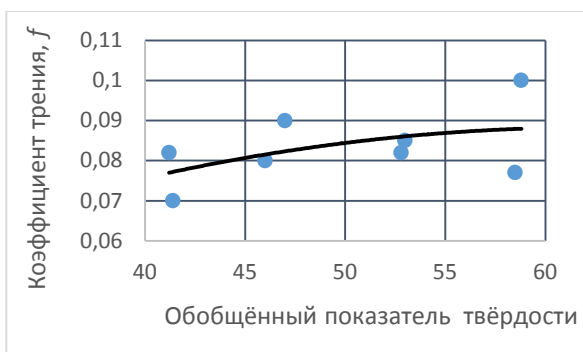


Рисунок 4 - Зависимость коэффициента трения образцов, выполненных на основе ПТФЭ от обобщенного показателя твердости.

Таким образом подтверждено, что при использовании в качестве оценочного показателя обобщенной твердости достигается более точное определение степени влияния исследуемых показателей. Такая картина по-видимому связана с тем, что в данном случае дифференцированно

учитывается твердость отдельных структурных составляющих композиционного материала, а также занимаемые ими доли на функциональных поверхностях образцов. Это дополнительно подтверждается и тем, что разброс и дисперсия обобщенного показателя изнашивания меньше, чем при использовании в качестве показателя твердости, чем определяемой по способу Бринелля.

Одновременно отмечено, что наиболее целесообразным для определения оптимального количества смазочных компонентов использование метода крутого восхождения (Бокса-Уилсона). При этом коэффициенты линейного уравнения регрессии являются координатами градиентов и позволяют определить направление движения к экстремуму. Соответственно по полученным данным, при приведенных режимах трения, можно рекомендовать такую структуру материала в которой суммарное количество смазочных составляющих находится в пределах 8-9 %.

1. Машков, Ю. К. Трение и модифицирование материалов трибосистем /Ю. К. Машков, К. Н. Полещенко, С. Н. Поворотнюк. – М.: Наука, 2000. – 280 с. – Текст: непосредственный.
2. Памфилов Е.А., Пилюшина Г.А., Прусс Б.Н., Алексеева Е.В. Новые антифрикционные материалы на основе модифицированной древесины // Материаловедение. 2009. № 4. С. 36–39.
3. Патент №2725902 Российская Федерация, МПК G01N 3/40 (2006.01). Способ определения твердости композиционных гетерогенных материалов: № 2019140373; заявл. 09.12.2019; опубл. 07.07.2020/ Памфилов Е.А., Капустин В.В., Пыриков П.Г., Пилюшина Г.А.; заявитель БГТУ. – 6 с.

ОБОСНОВАНИЕ АКТУАЛЬНОСТИ МОНИТОРИНГА ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТЕЙ КАТАНИЯ КАРЬЕРНЫХ РЕЛЬСОВЫХ ПУТЕЙ

А.М. Керопян

ООО «Московский научно-исследовательский проектно-изыскательский институт технологий и инноваций» (ООО «МНИПИИТИ»). Москва, Россия; am_kerop@mail.ru

В результате теоретических и экспериментальных исследований определена целесообразность проведения мониторинга геометрических характеристик поверхностей катания карьерного рельсового пути. Установлено, что радиусы кривизны контактирующих поверхностей системы колесо-рельс непосредственно влияют на фактическую площадь пятна контакта, от которой зависит тяговая способность карьерных локомотивов. Увеличение фактической площади пятна контакта системы колесо-рельс позволяет уменьшить контактные напряжения, увеличить ресурс рабочих поверхностей карьерного рельсового пути, повысить тяговую способность локомотива, а, следовательно, и его эксплуатационную производительность.

Ключевые слова: поверхность катания, система колесо - рельс, мониторинг, радиус кривизны профиля рельса, пятно контакта, контактное напряжение, конформный контакт, карьерный локомотив, тяговая способность, ресурс рельсового пути.

Цель

Взаимодействие колеса и рельса является физической основой движения подвижного состава по железным дорогам. От параметров этого взаимодействия во многом зависят тяговая способность локомотива, безопасность движения и основные технико-экономические показатели хозяйств пути и подвижного состава. Два ненагруженных цилиндрических тела с взаимно-перпендикулярными осями (поверхности катания колеса и рельса) касаются в одной точке. При нагружении вертикальной нагрузкой упругого колеса, опирающегося на упругий рельс, между ними образуется пятно контакта, форма которого близка к эллипсу.

Пятно контакта по своим размерам чрезвычайно мало и в среднем соответствует величине копеечной монеты. Это обуславливает в зоне контакта наличие значительных контактных напряжений. А это в свою очередь означает, что весь поезд массой порядка нескольких тысяч тонн опирается на поверхность, равную площади письменного стола средних размеров (порядка $0,8\text{ м}^2$). Для обеспечения бесперебойной работы подвижного состава находящаяся в объемно-деформированном состоянии зона контакта колес и железнодорожного пути должна выдерживать значительные нагрузки.

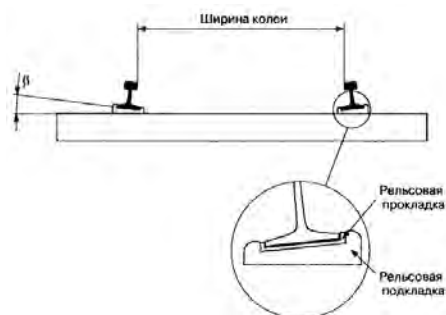


Рис.1 - Колея железнодорожного пути

Как показано на рис. 1, рельсы железнодорожных путей наклонены внутрь колеи под углом β к поверхности шпал так, чтобы их положение соответствовало углу наклона профиля поверхности катания колеса. При движении на прямых участках такое устройство пути способствует предотвращению вкатывания колеса на рельс, так как обеспечивает самоцентрировку катящейся по рельсовому пути колесной пары.

Актуальность проблемы

В процессе эксплуатации на стыковых соединениях происходит соударение колеса и рельса, при этом возникают динамические нагрузки, намного превышающие статические. Динамические нагрузки обусловлены также наличием на поверхности катания различных дефектов, в т. ч. - лысок (ползунов), возникающих в результате износа при торможении поезда; изменением геометрической формы в связи с усталостным износом поверхности катания колеса; или нарушением непрерывности поверхности катания рельсов на стрелочных переводах.

Особенностью **карьерного железнодорожного транспорта** является применение электро-возов и универсальных тяговых агрегатов со статической нагрузкой на ось до 300 кН. Также, в связи с наличием больших уклонов железнодорожных путей, достигающих 60 ‰ и более (до 80 ‰ - для условий глубоких карьеров), на карьерах применяются моторные думпкары со статической нагрузкой на ось до 350 кН. Кроме того, железнодорожные пути карьеров характеризуются значительной протяженностью кривых участков, при этом радиусы кривизны редко превышают 300 м. В большинстве случаев они находятся в пределах 100...200 м, [1]. Минимальная величина их может составлять 40...60 м. На некоторых горных предприятиях

протяженность кривых участков радиусом менее 350 м составляет более половины всей длины карьерных путей.

Другой отличительной особенностью карьерных рельсовых путей является применение «старогодных» рельсов (т.е. рельсов уже отработавших определенный период времени на магистральных железных дорогах), общая длина которых составляет до 50% от общей протяженности рельсовых путей карьеров [2]. Кроме того, наряду с постоянными, в силу технологической необходимости, на карьерах применяются также передвижные рельсовые пути. Передвижные рельсовые пути на карьерах в среднем перекадываются от 2 до 3,5 раза в год [1]. На большинстве карьеров отсутствуют технические средства для ремонта «старогодных» рельсов. Поэтому они должны удовлетворять требованиям действующих нормативно-технических документов, в зависимости от величины износа головки рельсов [2].

В связи с вышеизложенным, проблема мониторинга процесса взаимодействия колеса и рельса в условиях промышленных карьеров, с учетом специфики железнодорожного транспорта открытых разработок, имеет актуальное значение.

Материалы и методы исследования

Эффективность работы железнодорожного транспорта в условиях открытых горных работ определяется тяговой способностью локомотивов, на которую влияет много факторов и, в первую очередь, коэффициент сцепления бандажей колесных пар карьерных локомотивов с рельсами, который в свою очередь зависит от условий эксплуатации.

До настоящего времени не уделяется достаточного внимания исследованиям влияния геометрических характеристик поверхностей катания системы колесо-рельс карьерного железнодорожного транспорта на контактную прочность взаимодействующих тел, отсутствует непрерывный контроль поверхностей катания, являющихся важным фактором тяговой способности локомотивов.

В процессе эксплуатации при контактном взаимодействии колесо локомотива при качении в режиме тяги по рельсу движется со скольжением, вследствие чего трущиеся поверхности в зоне их контакта подвергаются повышенному износу (рис. 2 а, б). Этому также способствуют повышенные уклоны карьерных рельсовых путей, что в свою очередь обеспечивает увеличению скольжения тяговых колес карьерных локомотивов относительно рельсов.

Систематическое измерение профиля поперечного сечения и износа головки рельса имеет большое значение для управления и планирования ремонта и замены рельсов.



Рис. 2. - Поперечные сечения нового (а) и изношенного (б) рельсов.

В литературе [3,4] показана схема измерения износа рельса (рис. 3).

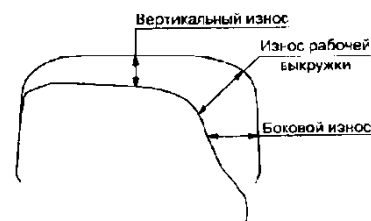


Рис. 3. - Схема измерения вертикального и бокового износов головки рельса.

Решение задачи о контактном взаимодействии и возникающих при этом контактных напряжениях и деформациях впервые было дано в 1881...1882 г.г. Г. Герцем с применением методов теории упругости. Для перекрещивающихся под прямым углом цилиндров (сопряжение системы колесо – рельс) параметры длин полуосей эллиптического пятна контакта a и b определяются по формулам (1)

$$\begin{cases} a = 1,397 \cdot n_a \sqrt[3]{\frac{N_k \cdot r \cdot R}{E \cdot r + R}} \\ b = 1,397 \cdot n_b \sqrt[3]{\frac{N_k \cdot r \cdot R}{E \cdot r + R}} \end{cases} \quad (1)$$

Коэффициенты n_a и n_b определяются по таблицам методом линейной интерполяции в зависимости от отношения r/R . Здесь r – радиус профиля катания колеса, R – радиус рабочего профиля рельса [5].

Контактная прочность рассчитывается по наибольшему напряжению сжатия $[\sigma_k]_{\max}$, действующему в центре пятна контакта [5]

$$[\sigma_k]_{\max} = \frac{1,5 \cdot N_k}{\Phi_k}, \quad (2)$$

где N_k – вертикальная нагрузка действующая на упругое колесо, Φ_k – расчетная площадь пятна контакта.

Для задачи контакта колеса и рельса

$$\Phi_k = \pi \cdot a(r.R) \cdot b(r.R) \quad (3)$$

где $a(r.R)$ и $b(r.R)$ соответственно большая и малая полуоси эллиптического пятна контакта, являющиеся функциями геометрических параметров (радиусов кривизны) взаимодействующих профилей колеса локомотива и рельса.

При силовом взаимодействии различных тел вращения (шарики и ролики подшипников

качения, колеса железнодорожного подвижного состава, катковые опоры мостовых конструкций и т.п.) в зоне контакта возникают контактные напряжения, величина которых при приложении нагрузки, обратно пропорциональна площади контактируемых поверхностей, формула (2). В свою очередь, площадь контактируемой поверхности (пятна контакта) колеса и рельса зависит от радиусов кривизны контактируемых поверхностей. Однако, в настоящее время при эксплуатации карьерного железнодорожного транспорта радиусы кривизны рабочих поверхностей рельсов практически не контролируются из-за отсутствия простых и удобных для применения в условиях открытых горных работ измерительных приборов.

Для решения данной технической проблемы предлагаются запатентованные нами соответствующие технические решения: способ определения радиуса кривизны цилиндрических поверхностей бесконечной длины и измерительный инструмент для контроля радиуса кривизны цилиндрических поверхностей бесконечной длины [6, 7]. Схема измерения радиуса кривизны рабочих поверхностей профиля рельса показана на рис. 4.

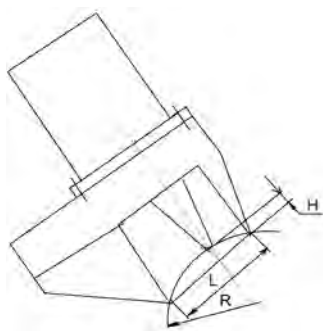


Рис. 4. – Схема инструмента для измерения радиуса кривизны.

Данные технические решения позволяют быстро и с минимальными трудозатратами с применением разработанной нами методики определить радиус кривизны рабочей поверхности цилиндрических поверхностей бесконечной длины (например – рельса) в условиях открытых разработок и принять меры для своевременного профилирования изношенных рельсов.

Сущность процесса измерения радиуса кривизны головки рельса заключается в **одновременном измерении ширины дорожки катания колеса по рельсу и высоты хорды, стягивающей дорожку катания**. Радиус кривизны взаимодействующих профилей R определяется по формуле

$$R = (l^2 + h^2) / 2h, \quad (4)$$

где l - полуширина дорожки катания, h - высота сегмента, ограниченного заключенной между дугой профиля цилиндрической поверхности дорожки катания рельса и хордой, стягивающей крайние точки дуги дорожки катания (рис. 5 а, б).

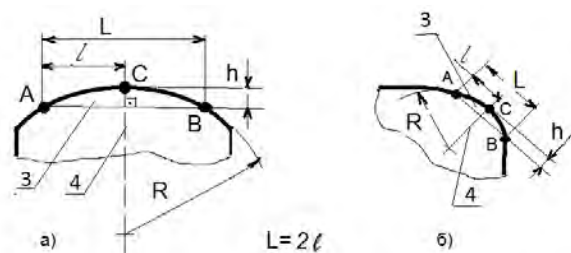


Рис. 5. – Измерение радиуса кривизны взаимодействующих профилей системы колесо - рельс: а - на прямолинейных участках, б - на криволинейных участках.

После получения результатов измерения, по приведенной ниже таблице можно определить радиус кривизны профиля: рельса или впадины (проката) изношенного профиля колеса (результат получится без сложных расчетов, например – методом интерполяции).

Таблица. – Геометрические параметры (радиусы кривизны) рабочих полуширина дорожки катания.

$l, \text{ мм}$	$h, \text{ мм}$							
	0.5	1	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
3	9.25	5.00	3.75	3.25	3.05	3.00	3.04	3.13
5	25.25	13.00	9.08	7.25	6.25	5.67	5.32	5.13
7	49.25	25.00	17.08	13.25	11.05	9.67	8.75	8.13
9	81.25	41.00	27.75	21.25	17.45	15.00	13.32	12.13
11	121.25	61.00	41.08	31.25	25.45	21.67	19.04	17.13
13	169.25	85.00	57.08	43.25	35.05	29.67	25.89	23.13
15	225.25	113.00	75.75	57.25	46.25	39.00	33.89	30.13
17	289.25	145.00	97.08	73.25	59.05	49.67	43.04	38.13
19	361.25	181.00	121.08	91.25	73.45	61.67	53.32	47.13
21	441.25	221.00	147.75	111.25	89.45	75.00	64.75	57.13
23	529.25	265.00	177.08	133.25	107.05	89.67	77.32	68.13
25	625.25	313.00	209.08	157.25	126.25	105.67	91.04	80.13
27	729.25	365.00	243.75	183.25	147.05	123.00	105.89	93.13
29	841.25	421.00	281.08	211.25	169.45	141.67	121.89	107.13
31	961.25	481.00	321.08	241.25	193.45	161.67	139.04	122.13

Результаты исследований их обсуждение.

Результаты исследований [8] показали, что мониторинг геометрических параметров поверхностей катания карьерного рельсового пути **позволит** путем своевременного профилирования

его рабочих поверхностей обеспечить **конформный контакт взаимодействующих поверхностей системы колесо-рельс, увеличить фактическую площадь контакта взаимодействующих тел и уменьшить величину контактных**

напряжений в пятне контакта, а также взаимный износ.

В результате выполненных исследований [9] нами получены зависимости радиусов кривизны рабочей поверхности головки рельса при одноточечном контакте (для прямых участков) – формула (5) и при двухточечном гребневом контакте (для криволинейных участков) – формула (6).

$$R = \frac{r \cdot (r - \sqrt{r^2 - l^2})}{S + r - \sqrt{r^2 - l^2}}, \quad (5)$$

$$R = \frac{\Delta \cdot r - r^2 - (\Delta - r)\sqrt{r^2 - l^2}}{\Delta - r + \sqrt{r^2 - l^2}}, \quad (6)$$

где r и R – радиусы профилей рабочих колеса и рельса, соответственно; l – полуширина полосы контакта; S и Δ – зазор между рабочими поверхностями системы колесо-рельс при одноточечном и двухточечном контактах, соответственно. Зависимости (5) и (6) представлены на рис. 6 а, б.

По этим графикам, предварительно определив полуширину полосы контакта, можно для обеспечения конформного контакта (зазор 0,2...0,8 мм) определить радиус R для профильной шлифовки рабочей поверхности рельса и выбрать радиус r профиля колеса, контактирующего с рельсом. Радиус профиля колеса должен контролироваться по шаблону, согласно [10].

Для обеспечения конформного контакта системы колесо-рельс с рациональными параметрами рельсы должны профилироваться согласно рекомендациям [11].

Соответствующие сочетания радиусов кривизны взаимодействующих поверхностей колеса и рельса по установленным математическим зависимостям, при которых образуется **конформный контакт**, позволяют улучшить характеристики сцепления и увеличить тяговую способность локомотивосостава.

Выводы

1. Наличие конформного контакта рабочих профилей колес карьерного железнодорожного транспорта с рельсами позволяет увеличить фактическую площадь пятна контакта системы колесо-рельс, уменьшить контактные напряжения в зоне контакта, увеличить ресурс рабочих поверхностей карьерного рельсового пути, повысить тяговую способность, и, следовательно, эксплуатационную производительность локомотива.

2. Предлагаемое техническое решение позволяет организовать мониторинг состояния рабочих профилей системы колесо-рельс карьерного железнодорожного транспорта и своевременно выполнять в условиях карьеров профилирование рельсовых путей для обеспечения конформного контакта колес локомотива с рельсами.

3. Соответствующие сочетания радиусов кривизны взаимодействующих поверхностей колеса и рельса по установленным математи-

ческим зависимостям, при которых образуется конформный контакт, позволяют улучшить характеристики сцепления и увеличить тяговую способность локомотивосостава.

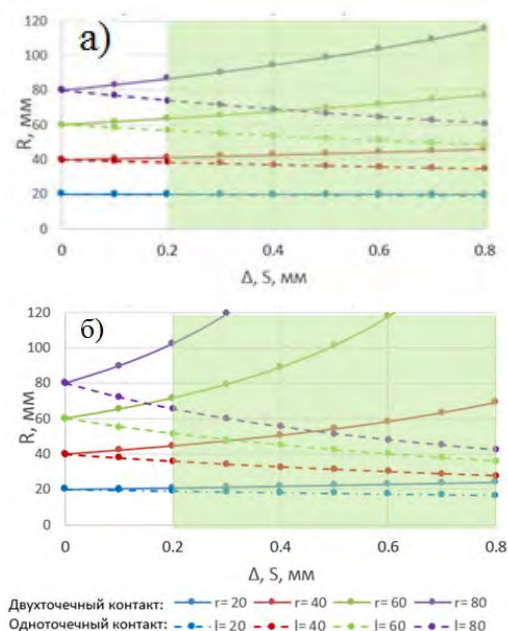


Рис. 6. – Графики зависимостей радиуса кривизны R головки рельса от зазоров S и Δ между рабочими профилями колеса и рельс: а) $l = 12$ мм, б) $l = 20$ мм.

4. Результаты экспериментальных измерений показали, что проблема мониторинга геометрических характеристик поверхностей катания карьерных рельсовых путей имеет актуальное значение.

1. Евдокимов Б.А., Забелин Г.Д. и др. Железнодорожный транспорт открытых разработок. М.: Недра. 1984. 181 с.
2. Рельсы «старогодние». ТУ № ЦПТ-80/350, Классификатор МПС.
3. Яковлев В.Л. Состояние, проблемы и пути совершенствования открытых горных разработок. // Горный журнал. – 2009. №11. С.11-14.
4. Чернышев М. А., Крейнис З. Л. Железнодорожный путь. М.: Транспорт. 1985. С.108.
5. Писаренко Г.С. и др. Справочник по сопротивлению материалов. Киев, Наукова думка. 1988, 776 с.
6. Патент РФ № 2566598 от 28.08.2014. Способ определения радиуса кривизны цилиндрических поверхностей бесконечной длины // Керопян А.М., Бибииков П.Я., Вержанский П.М., Басов Р. К. Бюл. № 30 от 27.10.2015.
7. Патент РФ № 2568332 от 28.08.2014. Измерительный инструмент для контроля радиуса кривизны цилиндрических поверхностей бесконечной длины. // Керопян А.М., Капуткин Д.Е., Бибииков П.Я. и др. Бюл. №32 от 20.11.2015.
8. Керопян А.М., Кряжев Н.М., Сизин П.Е., Басов Р.К. Условия взаимодействия колес карьерных локомотивов с рельсами и определение рациональных геометрических параметров их контактирующих поверхностей // Горная промышленность, 2012, июль-август. С.108-110.
9. Керопян А.М., Вержанский П.М., Басов Р.К. Рациональные геометрические параметры рабочих поверхностей рельса и бандажа колеса карьерного локомотива, работающего в режиме тяги // Горное оборудование и электромеханика, 2015. №1. С.28-33.
10. Инструкция по формированию, ремонту и содержанию колесных пар тягового подвижного состава железных дорог колеи 1520 мм (с изм. и доп. утв. МПС России от 23.08.2000, № К-2273у).
11. ГОСТ 11018-2000. Тяговый подвижной состав железных дорог колеи 1520 мм. Колесные пары. Общие технические условия.

МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ МОНОМОЛЕКУЛЯРНОГО СЛОЯ ВОДОРОДА НА АКТИВНЫХ ЦЕНТРАХ АДСОРБЦИИ

В.Н. Кокорин

Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск, Россия

Разработан способ деформационно-структурных превращений в системе: "металл-пора(жидкость)-металл" при реализации термомеханохимических реакций и имплантации ионов водорода в виде атомарно-молекулярной восстановительной (защитной) пленки при локализованном сдвиге структурно-неоднородных гетерофазных механических смесей на основе железа.

Проведенные исследования полученных структур позволили установить отсутствие разрушения границ зерен, что характеризует их как коррозионностойкие (глубина межзеренного разрушения не превышала 5...10 мкм как на поверхности контакта с деформирующим инструментом, так и в середине образцов, максимальная глубина деградации «разъедания» поверхности и разрушения границ зерен не превышала 0,025 мм, что позволяет сделать вывод, что межкристаллитной коррозии (МКК) в основном металле не выявлено.

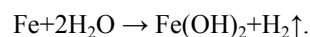
Установлено наличие ямок- точечных элементов разрушения поверхностей чашеобразной формы, представляющих собой поверхности микропор, которые могут являться очагами зарождения внутризеренных микропор, образованных путем конгломерации в процессе локализованного сдвига групп зерен, имеющие внутризеренные изолированные поры. Данное явление было отмечено Бальшиным М.Ю [1]. Инициаторами ямок могут быть как включения фаз, так и микронеровности на границах зерен. Возможно, образуемые межзеренные и внутризеренные ямки могут выполнять функцию "ловушек", ответственных за захват атомов/ молекул водорода. К данному выводу приходит и ряд ученых - материаловедов, утверждающих, что подобными "ловушками" являются дефекты кристаллической решетки, в том числе и граница зерен [2-4]. Концентрация водорода в кристаллической решетки в окрестности раздела фаз и границ зерен снижается вследствие стока водорода на эти границы, так и во внутрезеренные ямки и локализация в стоке молекулярного водорода. Можно предполагать, что именно ямки межзеренной и внутризеренной ориентации могут служить коллекторами стока как атомного, так молекулярного водорода.

Связанный водород в стали, находясь в коллекторах, не ухудшает механические свойства стали, поскольку не может легко диффундировать в процессе деформации.

В результате деструкции воды под действием гидродинамической кавитации в процессе интенсивного уплотнения увлажненных механических смесей наблюдается явление

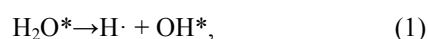
механотермолиза (разложение) воды при котором в воде инициируются механохимические реакции с образованием $\text{HO}_2^\cdot$, O_2^{2-} , H_2O_2 , $\text{OH}^\cdot$; образуются новые водородные связи, то есть распад молекул воды на атомы водорода и радикалы. $\text{OH}^\cdot$ [5].

Образование водорода при механоактивации воды проходит непосредственно за счет ее взаимодействия с тонкодисперсным железом структуры прессовки:



Резюмируя, можно сделать вывод, что при высоких давлениях прессования железного порошка ($\geq 1,5 \dots 1,6$ ГПа) в условиях локализованного сдвига участков сосредоточения микропор, содержащих воду с растворенным воздухом пор, происходит искажение кристаллической решетки металла, что способствует возникновению точечных дефектов и линейных дислокаций, как правило, несущих запас "избыточной" энергии. Избыток энергии, накапливаемый в процессе образования и роста дефектов, расходуется непосредственно на разрушение внутри/межмолекулярных связей воды (процесс механодеструкции)

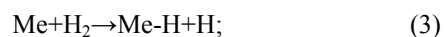
Диссоциация (разложение) воды в процессе ее механолиза происходит по зависимости:



Одновременно происходит изменение структуры воды с образованием свободных водородных связей, что обуславливает ее повышенную активность и реагентную способность.

Таким образом, возможно, за счет первоначального протекания процесса механоактивации твердофазной системы: "металл (железо) – жидкость (вода)" выход водорода увеличивается.

Способность поверхности сильно нагретых металлов (в исследуемом процессе в результате "теплого" спекания) генерировать в объеме свободные атомы раскрыта еще в ранних трудах Ленгмюра, на основе которых был создан метод получения атомов водорода в малых количествах:



На возможность протекания процесса минимизации МКК (при механохимическом воздействии) дает основание тот факт, что в этом процессе в результате интенсивных сдвиговых деформации с локализацией в межзеренной плоскости непрерывно образуется ювенальная поверхность и, как следствие, межзеренное сращивание с уменьшением протяженности границ зерен (учет производится, рассчитывая коррелирующий коэффициент изменения контактной поверхности χ , тогда как мономолекулярный слой водорода локализуется на активных центрах адсорбции (пики и впадины поверхности микронпор - "ловушек").

Предположительно, именно образуемые данные мономолекулярные слои водорода, "размазываясь" по структуре всего объема металла (рис 1), препятствуют процессам оксидирования, а в некоторых случаях и способствуют восстановлению оксидов (при спекании прессовок). Предложенная модель образования мономолекулярного слоя водорода на активных центрах адсорбции при интенсивном структурном деформационном сдвиге и возникновение термомеханохимических реакций позволяет объяснить интерфейс взаимодействий границ между функциональными объектами «металл-пора(жидкость)-металл».

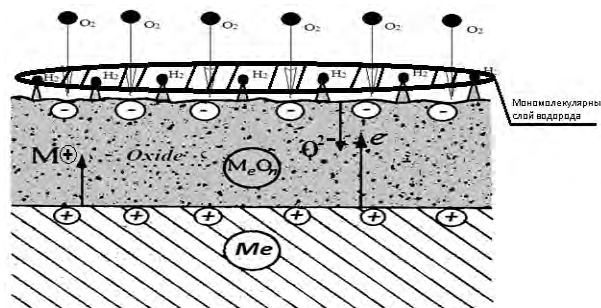


Рисунок 1. – Схема образования мономолекулярного слоя водорода на активных центрах адсорбции

Можно предположить, что использование подобных коррозионностойких композиций на основе железа и создание технологической рекомендации по разработке технологий получения коррозионностойких сталей широкого спектра марок и назначения; позволит решить ряд технологических проблем как при производстве, так и эксплуатации готовой продукции в агрессивной среде и может быть использована как в народном хозяйстве, так и в оборонном комплексе страны при производстве изделий повышенной коррозионной стойкости.

1. Захарова А.П. Взаимодействие водородов с металлами. М.:Наука,1987.-296с.
2. Калабухова Н.А. Исследование процессов абсорбции и диффузии водорода в ГЦК металлах методом молекулярной динамики. Дисс. канд. наук. Барнаул, 2014, 126с.
3. В. И. Волков, В.Н. Беккер, И.Б. Катраков и др. Механохимические преобразования воды в высокоградиентных потоках // Известия АлтГУ – 2007, №3 (55), С.63-70.
4. Патент РФ №2399458. «Способ прессования высокоплотных заготовок и деталей из металлического порошка в присутствии жидкой фазы», Кокорин В.Н., 2010.
5. Патент РФ №2638869. «Способ получения защитной оксидной пленки на металлической поверхности», Кокорин В.Н., 2018.

К ВОПРОСУ О ТЕЧЕНИИ МЕТАЛЛА ПРИ ПРЕССОВАНИИ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ПРОФИЛЕЙ С ОТВЕРСТИЕМ ИЗ КРУГЛОГО КОНТЕЙНЕРА

К.В. Королев, Ю.М. Ермаков, В.Г. Белов

Российский технологический университет «МИРЭА», Москва, Россия; korolev_252@mail.ru

Работа посвящена вопросам исследования течения металла при прессовании прямоугольных профилей с одним или несколькими отверстиями с использованием программы QForm.

Цель

Известно, что при прессовании профиля со смещенным отверстием или несколькими отверстиями из цилиндрического контейнера течением металла игла или иглы стремятся сместиться к центру тяжести профиля.

Для прессования профилей с заданным расположением охлаждающих отверстий применяют различные калибровки матриц: матрицы с холостым прутком «рис. 1а», плосконаклонные «рис. 1б», наклонные «рис. 1в», а также прессование в две нитки «рис. 1г».

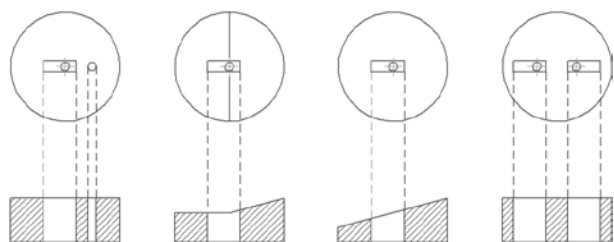


Рис. 1. Калибровки матрицы для регулирования течения металла: а - с холостым прутком, б - плосконаклонная, в - наклонная, г - прессование в две нитки..

Для расчета частных вытяжек используется следующая схема: сечение слитка и профиля разбивают вертикальной плоскостью перпендикулярной оси симметрии плоскости и проходящей через центр сечения отверстия (для профиля с двумя отверстиями рассматривают только половину сечения слитка и профиля) «рис. 2».

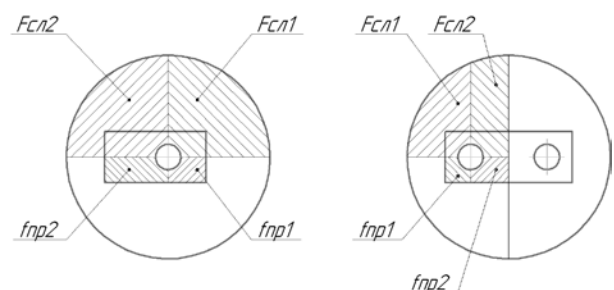


Рис. 2. Схема расчета коэффициента вытяжки по частям профиля

При прессовании профиля из круглого контейнера цилиндрических труб, прутков, симметричных профилей сплошных и с отверстием течение металла имеет радиальную направленность [1] и, вероятно,

это радиальная направленность с некоторым видоизменением будет и для прессования несимметричных профилей и плоскость раздела течения не будет вертикальна «рис. 3».

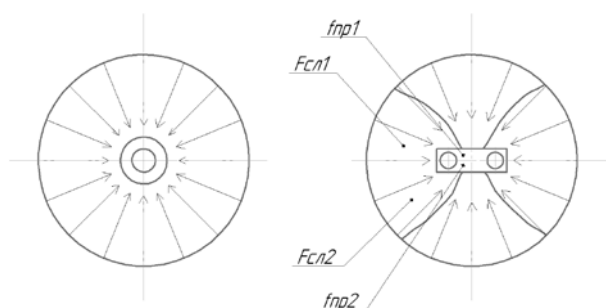


Рис. 3. Схема радиального течения металла

Цель: исследовать характер деформации металла при прессовании (скорость прессования $V=10\text{ мм/с}$) на плоской матрице, матрице с двускатным наклонным зеркалом $\alpha=15^\circ$ как внутрь заготовки (домик), так и внутрь матрицы (перевернутый домик). Поставленная задача решалась путем 3д моделирования в системе QForm [2] при горячем прессовании прямоугольного профиля $20 \times 60\text{ мм}$ в контейнере $D=180\text{ мм}$ из медных слитков длиной $L=300\text{ мм}$ «рис. 4».

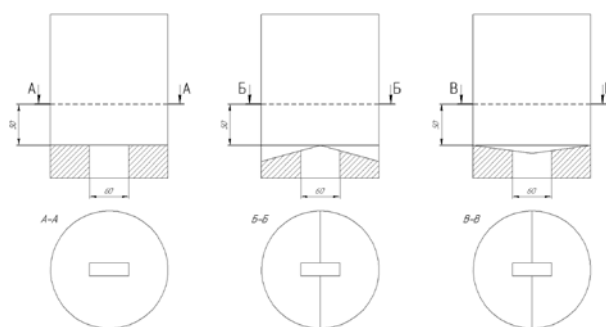


Рис. 4. Постановка задачи исследования в программе QForm

Результаты исследований.

Замеры V_x и V_y проводили в 15 точках по сечению слитка в том числе 4 точки по оси X ($y=0$): $X_1=0$; $X_2=25$; $X_3=50$; $X_4=75$ и 4 точки по оси Y ($x=0$): $Y_1=0$; $Y_2=25$; $Y_3=50$; $Y_4=75\text{ мм}$ «рис. 5».

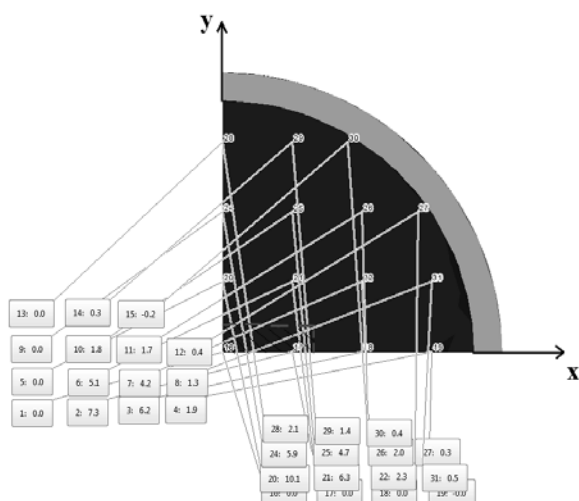


Рис. 5. Методика замера скоростей V_x и V_y

Результаты измерения V_x и V_y по принятым координатам точек приведены в «табл. 1» для плоской матрицы, «табл. 2» для двускатной в сторону заготовки и «табл. 3» для двускатной в сторону матрицы.

Таблица 1 – Плоская матрица

Координаты точек $x;y$	Значения скоростей по оси x и оси y	
	V_x , мм/с	V_y , мм/с
0;0	0	0
25;0	7.3	0
50;0	6.2	0
75;0	1.9	0
0;25	0	10.1
25;25	5.1	6.3
50;25	4.2	2.3
75;25	1.3	0.5
0;50	0	5.9
25;50	1.8	4.7
50;50	1.7	2
70;50	0.4	0.3
0;75	0	2.1
25;75	0.3	1.4
45;75	-0.2	0.4

Таблица 2 – Матрица с наклонами внутрь заготовки

Координаты точек $x;y$	Значения скоростей по оси x и оси y	
	V_x , мм/с	V_y , мм/с
0;0	0	0
25;0	2.8	0
50;0	2.4	0
75;0	1	0
0;25	0	3
25;25	2	2.1
50;25	2	1.1
75;25	0.7	0.3
0;50	0	2.6
25;50	0.9	2
50;50	1	1
70;50	0.2	0.2
0;75	0	1.1
25;75	0.2	0.7
45;75	0.1	0.2

Таблица 3 – Матрица с наклонами внутрь матрицы

Координаты точек $x;y$	Значения скоростей по оси x и оси y	
	V_x , мм/с	V_y , мм/с
0;0	0	0
25;0	4.5	0
50;0	3.6	0
75;0	1.5	0
0;25	0	-4.5
25;25	3	-2.5
50;25	2.7	-1.3
75;25	1	-0.3
0;50	0	-3.3
25;50	1.3	-2.3
50;50	1.2	-1.1
70;50	0.3	-0.1
0;75	0	-1.2
25;75	0.3	-0.9
45;75	0.2	-0.1

Характер деформации металла в рассматриваемых задачах имеет симметричную картину для плоской и для двускатных матриц «рис. 6».

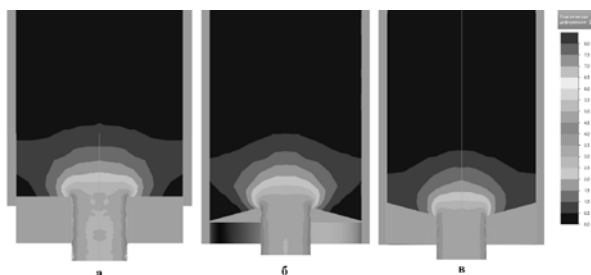


Рис. 6. Очаг пластической деформации при проходе пресс-шайбы на 40мм: а – плоская матрица, б – матрица с наклонами внутрь заготовки «домик», в – матрица с наклонами внутрь матрицы «перевернутый домик»

По результатам замера скоростей V_x «рис. 7» и V_y «рис. 8» построены графики изменения их в направлении X по сечениям Y .

На осях симметрии X и Y скорости V_x и $V_y = 0$

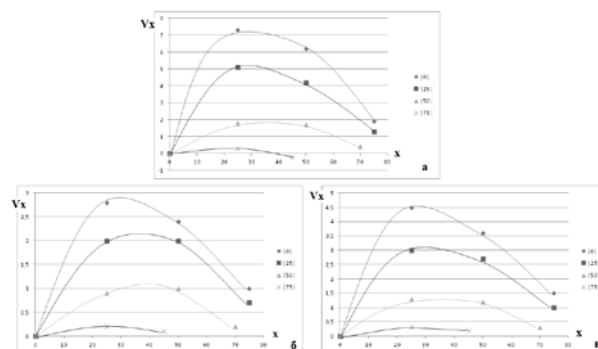


Рис. 7. Сечения полей скоростей V_x : а – плоская матрица, б – матрица с наклонами внутрь заготовки «домик», в – матрица с наклонами внутрь матрицы «перевернутый домик»

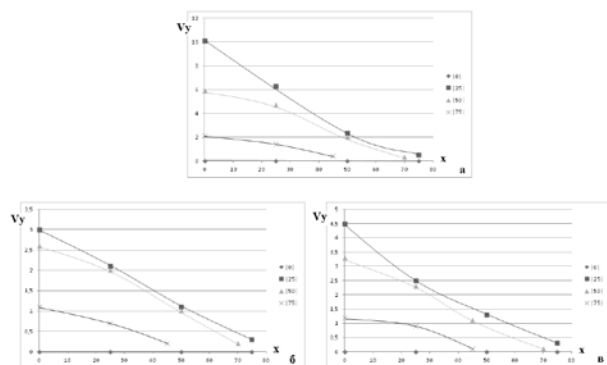


Рис. 8. Сечения полей скоростей V_y : а – плоская матрица, б – матрица с наклонами внутрь заготовки «домик», в – матрица с наклонами внутрь матрицы «перевернутый домик»

При определении координат линии раздела течения в рассматриваемых сечениях ($Z=50\text{ мм}$) совмещали графики V_x и V_y «рис. 9» и точка пересечения их ($V_x=V_y$) будет характеризоваться координатами, через которую проходить линия раздела течения.

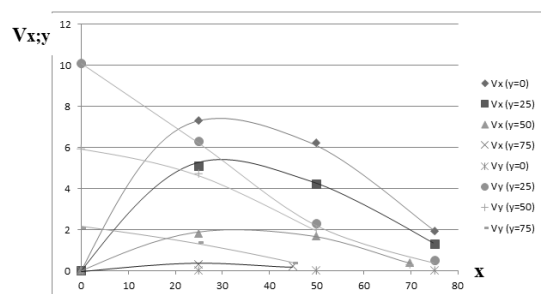


Рис. 9. Совмещенный график плоской матрицы

Значение координат полученных точек линии скольжения для плоской и для двускатных матриц приведены в «табл. 4».

Таблица 4 – Координаты линии раздела течения металла

№ п/п	матрица	x	y	$V_x = V_y$
1	плоская	18	10	7.5
2		23	15	6
3		27	20	4.8
4		30	25	5.7
5		55	50	1.8
6	«домик»	28	25	2
7		50	50	1
8	«перевернутый домик»	23	25	2.8
9		45	50	1.4

Графические линии раздела в сечении X и Y приведены на графике «рис. 10». Эта линия явно не вертикальная, а более близка к радиальной линии. То есть и при прессовании профилей течение близко к радиальному.

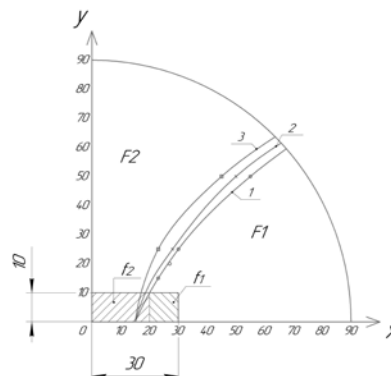


Рис. 10. График линий раздела течения

Из приведенных исследований следует, что при расположении центра иглы по координате X от нуля до 15 мм воздействие на иглу скоростей V_x , стремящихся сместить иглу к центру, практически отсутствует. При расположении центра иглы в положении $X > 15$ мм игла будет смещаться к центру контейнера и необходимо применять специальные мероприятия по выравниванию скоростей течения металла.

Принято, что условие $V_x = V_y$ характеризует координаты линии раздела течения.

Определены линии раздела течений металла по сечению слитка, показано что эти линии не являются вертикальными, а определяют радиальное течение металла.

Линии раздела течений выделяют зоны преимущественного течения металла V_x и V_y по сечениям слитка и профиля. При расположении иглы в зоне $f_{пр2}$ воздействие на иглу потоков металла со скоростью V_x минимальна и вероятность смещения иглы из заданного положения минимально.

1. Прессование. Справочное руководство/Д-р. М. Баузер, проф., д.т.н. Г. Зауер, проф., д.т.н. К. Зигерт М.: «АЛЮСИЛ МВит», Москва, 2009. – С.918. Рис.651.
2. QForm 2D/3D. Программа для моделирования процессов обработки металлов давлением [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://qform3d.ru/files_ru/qform_manual_part1.russian.pdf

НАПРАВЛЕННОЕ ФОРМИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ПРИ РАЗРАБОТКЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ С ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИМИ ПОКРЫТИЯМИ

А.С. Краско^{1,2}

¹ Московский государственный технический университет имени Н.Э.Баумана, Москва, Россия

² Российский технологический университет «МИРЭА», Москва, Россия

В статье представлен пример использования подхода направленного формирования показателей качества при обеспечении эксплуатационных свойств установочных элементов станочных приспособлений с газотермическими покрытиями.

Введение

В настоящее время актуальной задачей является повышение точности изготовления ответственных изделий машин, таких как детали авиа- и двигателестроения (лопатки, валы, детали гидравлики и газотурбинных двигателей).

Точность механической обработки указанных деталей обусловлена точностью изготовления, сборки и настройки элементов технологической системы (станок – приспособление – инструмент – деталь).

В условиях современного машиностроительного производства, которое имеет по большей части мелкосерийный характер и высокий уровень автоматизации (гибкие производственные системы), значительную долю в погрешность механической обработки вносят станочные приспособления. Это связано с быстрым изнашиванием установочных элементов приспособлений ввиду частых смен обрабатываемых изделий. [1-6]

Таким образом, актуальной является задача повышения износостойкости установочных элементов станочных приспособлений, применяемых в автоматизированных технологических комплексах.

Выбор методов упрочняющей технологии

С целью повышения эксплуатационных свойств элементов станочных приспособлений применяются следующие методы [7]:

1. Химико-термическая и термическая обработка (ХТО и ТО);
2. Применение износостойких материалов, например твердых сплавов группы ВК;
3. Нанесение износостойких покрытий методами CVD, PVD и газотермическим напылением (ГТН).

Выбор метода и способа упрочнения поверхности установочного элемента приспособления зависит от технологических возможностей метода и способа, а также от условий производства [7].

В настоящее время в условиях мелкосерийного автоматизированного производства применяются групповые или быстросменные приспособления, собранные по блочно-модульному принципу и имеющие как стандартные, так и специально изготавливаемые элементы [3-6]. Под такими элементами обычно понимают специальные губки тисков для

установки нескольких заготовок при обработке на обрабатывающих центрах (см. рис. 1), губки специальной конструкции токарных патронов, сменные наладки групповых приспособлений и т.п.

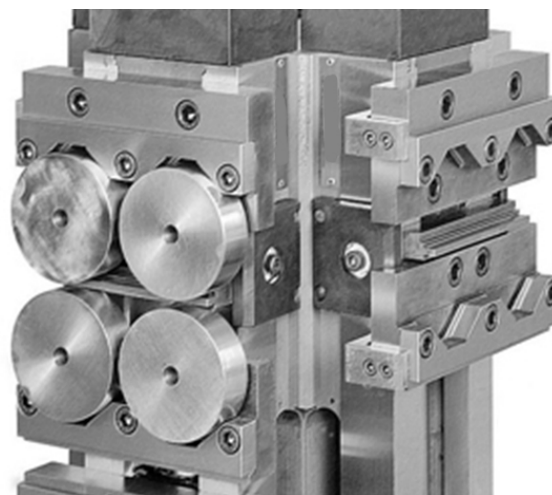


Рис. 1. Многоместное приспособление для обрабатывающих центров со специальными призматическими губками

Специальная конструкция не позволяет применять методы ХТО, ТО и нанесения покрытий способами CVD и PVD в качестве упрочняющей технологии ввиду значительной стоимости при единичном изготовлении деталей.

Применение износостойких материалов, типа твердых сплавов) ограничено их высокой стоимостью и невозможностью изготовления форм для спекания при единичном изготовлении. Поэтому наиболее рациональным является применение сменных вставок, в виде пластин твердого сплава, в качестве рабочих элементов приспособлений. Однако, это возможно только при достаточных габаритах приспособления для возможности размещения механизма крепления пластин.

Однако, для ответственных деталей авиационной гидравлики, например плунжерных насосов, применяются небольшие по размеру приспособления. Для таких приспособлений наиболее подходящим методом упрочнения является нанесение износостойких покрытий газотермическими методами напыления.

Данная технология упрочнения позволяет эффективно наносить покрытия на поверхности разных размеров и габаритов, а отсутствие необходимости в защитной атмосфере позволяет успешно применять данный метод при изготовлении единичных изделий. [7-10]

Направленное формирование показателей качества изделий

На данный момент не существует обобщенных рекомендаций и методики разработки технологических процессов изготовления изделий с газотермическими покрытиями [8-19], что вызывает значительные трудности при внедрении данной технологии упрочнения.

Основными параметрами качества (ПК) при нанесении газотермических покрытий являются [8, 9]:

σ_s – прочность сцепления покрытия с материалом основы, МПа;

H – микротвердость покрытия;

P – пористость покрытия, %.

При этом прочность сцепления σ_s является основным ПК, так как обеспечивает работоспособность всего установочного элемента приспособления.

С целью оценки прочности сцепления покрытия при упрочнении установочных элементов станочных приспособлений воспользуемся положениями теории направленного формирования показателей качества при изготовлении деталей машин [20, 21].

«Направленное формирование показателей качества изделий» – стратегия разработки технологического процесса (операции), направленная на достижение заданных свойств изделий с максимальной производительностью и минимальными затратами, посредством учета взаимосвязей формируемых показателей качества с параметрами процесса обработки [8].

Анализируя зависимости [11-19] прочности сцепления от технологических режимов напыления покрытий, можно записать, что прочность сцепления, определяемая прочностью адгезии, когезии и остаточными напряжениями в покрытии, зависит от температуры, давления и времени контакта частиц напыляемого материала с поверхностью напыления. Помимо этого, важным фактором является качество напыляемой поверхности (основы):

$$\sigma_s(\sigma_a, \sigma_k, \sigma_{r.c}) \approx f(\Theta_c, p_c, \tau_c, P_b), \quad (1)$$

где σ_a – прочность адгезии покрытия с основой, МПа; σ_k – когезионная прочность, МПа; $\sigma_{r.c}$ – остаточные напряжения первого рода в покрытии, МПа; Θ_c – температура контакта частицы с поверхностью напыления, К; p_c – давление на контакте частицы с поверхностью напыления, МПа; τ_c – время контакта частицы с поверхностью напыления, с; P_b – показатели качества поверхности основы.

Параметры Θ_c , p_c , τ_c находятся в зависимости от дистанции напыления L (рис. 2), места ввода распы-

ляемых частиц (G_m) и параметров процесса нагрева частиц:

Θ_h – температура среды на участке нагрева, К;

τ_1 – время нахождения частиц на участке нагрева, с;

l_a – средняя длина начального (активного) участка струи, мм.

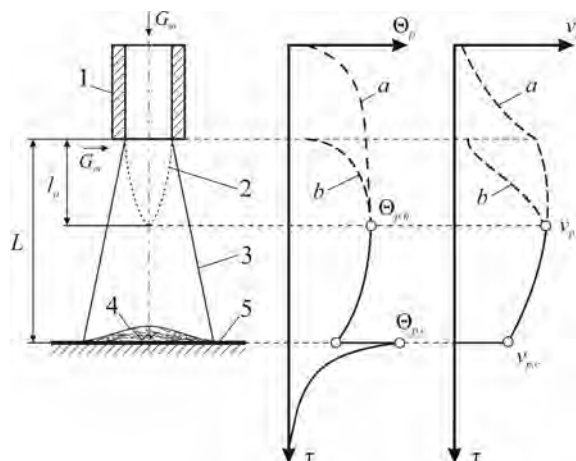


Рис. 2. Изменение температуры (Θ_p) и скорости (v_p) частиц напыляемого материала от времени (τ): 1 – зона нагрева, диспергирования и ускорения частиц напыляемого материала (распылитель); 2 – активный участок струи; 3 – основной участок струи; 4 – формируемое газотермическое покрытие; 5 – поверхность основы; а – кривые роста температуры и скорости частиц при осевой подаче распыляемого материала; б – кривые роста температуры и скорости частиц при радиальной подаче распыляемого материала за срезом сопла

Указанные параметры, в свою очередь зависят от режимов напыления, которые обобщенно для всех способов газотермического напыления можно представить следующим образом [8]:

$$\{Z\} = \{N_s, K_h, K_n, K_a, K_g, K_m, G_m, D, L, \Theta_b\}, \quad (2)$$

где N_s – мощность, подводимая к распылителю, кВт; K_h – тип и характеристика источника нагрева; K_n – конструктивные параметры зоны ускорения (сопла), к которым относится диаметр и длина сопла, а также его профиль; K_a – свойства окружающей среды (атмосферы); K_g – теплофизические свойства распыляющего (горючего) газа; K_m – химический состав и теплофизические свойства материала напыляемых частиц; G_m – скорость подачи (расход) распыляемого материала, кг/мин; D – диаметр частиц, мм; Θ_b – температура поверхности напыления, К.

Исходя из сказанного, уравнение направленного формирования показателей качества изделий, изготавливаемых с применением газотермического напыления, представим следующем виде:

$$\sigma_s(\sigma_a, \sigma_k, \sigma_{r.c}) = f(\{Z\}, P_b, K_1, K_2), \quad (3)$$

где K_1 – условия реализации метода воздействия (обработки) рассматриваемого этапа технологического процесса; K_2 – воздействия случайного характера рассматриваемого этапа технологического процесса.

Для раскрытия полученных функциональных за-

висимостей требуется провести ряд технологических экспериментов с варьированием факторов правой части уравнения (3). В результате будет получена регрессионная модель, позволяющая определить оптимальные параметры процесса напыления покрытия по критерию максимальной прочности сцепления.

Выводы

Направленное формирование показателей качества позволяет выявить связь между получаемыми показателями качества, исходными параметрами и технологическими режимами процесса обработки.

Рассматриваемый подход, применимо к технологии газотермического напыления износостойких покрытий установочных элементов станочных приспособлений, позволит повысить точность оценки параметров качества получаемых покрытий, что, в свою очередь, уменьшит риски внедрения технологии газотермического напыления в действующие производства.

Применение станочной оснастки с более износостойкими установочными элементами позволит повысить точность установки и её повторяемость при механической обработке ответственных деталей машин в условиях мелкосерийного автоматизированного производства, повысить долговечность приспособлений и, соответственно, снизить себестоимость изготавливаемых изделий.

1. Manu. G., Vijay Kumar. M., Nagesh. H., Jagadeesh. D., Gowtham. M.B. Flexible manufacturing systems (fms): a review // International Journal of Mechanical and Production – 2018. №8. – P. 323-336.
2. Sanjib Kumar Saren, Tiberiu Vesselenyi. Review of flexible manufacturing system based on modeling and simulation // Annals of the university of Oradea – 2016. №1. – P. 113-118.
3. Kashif Mahmood, Tatjana Karaulova, Tauno Otto, Eduard Shevtshenko. Performance Analysis of a Flexible Manufacturing System (FMS) // Procedia CIRP – 2017. №63. – P. 424-429.
4. F.T.S. Chan, R. Bhagwat, S. Wadhwa. Comparative performance analysis of a flexible manufacturing system (FMS): a review-period-based control // International Journal of Production Research – 2008. №46. – P. 1-24.
5. O.A. Joseph, R. Sridharan. Effects of flexibility and scheduling decisions on the performance of an FMS: simulation modelling and analysis // International Journal of Production Research – 2012. №50. – P. 2058-2078.
6. Tullio Tolio. Design of Flexible Production Systems. Methodologies and Tools – 2009. Springer. – 295 p.
7. Албагачиев А.Ю., Ковалев А.А., Краско А.С. Выбор метода упрочняющей обработки деталей машин в условиях автоматизированного мелкосерийного производства. Проблемы машиностроения и автоматизации, 2021. №2. С. 4 – 12.
8. Ковалев А.А., Краско А.С. Влияние параметров газотермического напыления на прочность сцепления функциональных стойких покрытий // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2021. №3. – С. 31-39
9. Ковалев А.А., Краско А.С. Перспективы сокращения трудоемкости изготовления деталей машин за счет применения функциональных покрытий. Механика и машиностроение. Наука и практика, 2020. Т. 3. С. 27 – 30.
10. Ковалев А.А., Краско А.С. Перспективы и проблемы применения сверхзвукового плазменного напыления в условиях мелкосерийного производства. Современные материалы, техника и технология, 2020. С. 174 – 177.
11. Калита В.И., Комлев Д.И., Плазменные покрытия с нанокристаллической и аморфной структурой. – М.: «Лидер М», 2008. – 388 с.
12. Кудинов В.В., Бобров Г.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование. Учебник для вузов. – М.: Metallurgy, 1992. – 432 с.
13. Пузряков А.Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления: Учеб. пособие по курсу «Технология конструкционных материалов». 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 360 с.
14. Газотермическое напыление: учеб. пособие / Под ред. Л.Х. Балдаева. – М.: Маркет ДС, 2007. – 344 с.
15. Процессы формирования газотермических покрытий и их моделирование / А.Ф. Ильющенко, А.И. Шевцов, В.А. Оковитый и др. – Минск: Беларус. навука, 2011. – 357 с.
16. W. Tillmann, L. Hagen, C. Schaak, J. Liß, M. Schaper, K.-P. Hoyer, M. E. Aydinöz, K.-U. Garthe. Adhesion of HVOF-sprayed WC-Co coatings on 316L substrates processed by SLM // Journal of thermal spray technology – 2020. №29. – С. 1396-1409.
17. Ashok Meghwal, Ameer Anupam, B. S. Murty, Christopher C. Berndt, Ravi Sankar Kottada, Andrew Siao Ming Ang. Thermal spray high-entropy alloy coatings: a review // Journal of thermal spray technology – 2020. №29. – С. 857-893.
18. Georg Mauer, Robert Vaßen, and Detlev Stöver. Plasma and particle temperature measurements in thermal spray: approaches and applications // Journal of thermal spray technology – 2011. №3(20). – С. 391-406.
19. Jing Xue, Min Huang. Optimization of plasma spray process VIA orthogonal test design method, SVM, and improved PSO // International journal of materials, mechanics and manufacturing – 2017. №3(5). – С. 153-158
20. Направленное формирование свойств изделий машиностроения / Под ред. А.И. Кондакова. – М.: Машиностроение, 2005. – 352 с.
21. Технологическая наследственность в машиностроительном производстве / Под ред. А.М. Дальского. – М.: Изд-во МАИ, 2000. – 364 с.

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ FDM-ПЕЧАТИ НА СОЕДИНЕНИЕ ИЗДЕЛИЯ С РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ 3D-ПРИНТЕРА

И.В. Кудрявцев, Е.В. Преображенская, Т.Н. Боровик, К.А. Евдокимов

Российский технологический университет РТУ «МИРЭА», Москва, Россия

В данной статье рассматривается влияние различных факторов, связанных с обеспечением соединения между печатаемым материалом и рабочей поверхностью стола 3D-принтера. Приводятся параметры печати для наиболее распространённого материала, используемого в FDM технологии. В качестве исследуемых моделей были выбраны цилиндры различных диаметров и плоские объекты с острыми углами по типу звёзд.

Ключевые слова: аддитивные технологии, адгезия, соединение, PLA

Наиболее распространённой проблемой при трёхмерной печати является проблема образования соединения между первым слоем печатаемой детали и рабочей поверхностью платформы [1]. Основными причины отсутствия образования связи между первым печатаемым слоем и столом являются выбор неправильных режимов печати и плохая адгезия между некоторыми веществами.

В качестве моделей для исследования были выбраны объекты имеющие факторы, обеспечивающие слабое сцепление с поверхностью стола, а в качестве материала для печати был выбран полилактид (PLA), имеющий широкий спектр применения в FDM-печати [2].

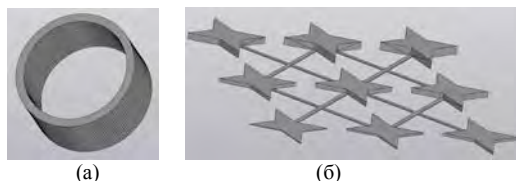


Рис.1. Модели для печати:
(а) – полый цилиндр; (б) – остrokонечные звёзды

Для исследования особенностей сцепления использовались различные способы обработки поверхности и покрытия, а печать моделей производилась на FDM/FFF принтерах Raise3D Pro2 и Designer X PRO.



Рис.2. Picaso 3D Designer X PRO и Raise3D Pro2

В качестве материала основы рабочей платформы использовались стекло и сталь. Печать моделей производилась как на обычной поверхности, так и с применением специальных покрытий, таких как тонкий слой, образованный спрей-адгезивом, покрытие из двустороннего скотча, покрытие из поли-

мерного термостойкого материала «BuildTak Original».

Режимы печати выбирались в соответствии с рекомендациями, данными производителем филамента и представлены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры режима печати пластиком PLA

Высота слоя	0.2 мм
Толщина слоя	2 мм
Высота первого слоя	0.3 мм
Температура экструдера	205°C
Скорость печати	50 мм/с

По результатам проведения экспериментов были сделаны следующие выводы:

1) Печать при отсутствии подогрева стола на стекле и полимерном покрытии дала отрицательный результат: сцепления между деталью и рабочей поверхностью установить не удалось.

2) Печать с подогревом стола в 60°C дала положительный результат только на покрытии из полимерного материала, на чистой поверхности качество адгезии между печатаемым изделием и рабочей поверхностью оказалось неудовлетворительным и привело к образованию дефектов.

3) Печать с использованием клеевой прослойки и подогревом стола привела к возникновению хорошей адгезии, как на стеклянной поверхности, так и на поверхности из специального полимерного покрытия, однако на тонкостенных элементах малых диаметров образовались дефекты в виде разрывов в зонах образования бокового шва.

4) Использование двустороннего скотча помогает обеспечить достаточную адгезию как при печати с подогревом, так и без. Однако из-за образования сильных связей между адгезивом и покрытием это может привести к образованию механических повреждений в самом покрытии при удалении готовых моделей со стола, в связи с этим использование двусторонних скотчей рекомендуется только в случае твёрдых поверхностей, таких как стекло или сталь.

- ГОСТ Р 57558-2017/ISO/ASTM 52900:2015 Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 1. Термины и определения
- Гибсон Я., Розен Д., Стакер Б. Технологии аддитивного производства. Трёхмерная печать, быстрое прототипирование и прямое цифровое производство М.: ТЕХНОСФЕРА, 2018. – 648 с.

ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ПАР ТРЕНИЯ ОПОРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИНЖЕНЕРНЫХ СЕТЕЙ

О.И. Кулаков

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; kulakov@imash.ru

В данной работе были проведены сравнительные испытания полиэтиленовых пар трения скользящих опор тепловых сетей ПНД ПЭ-100 – ПНД ПЭ-100 и ПНД ПЭ-100 – СВМПЭ РЕ-500 в условиях, приближенных к условиям реальной эксплуатации. Установлено, что СВМПЭ РЕ-500 обладает более высокой износостойкостью, в т.ч. при абразивном изнашивании материалов пары трения, что позволяет рекомендовать его к применению в опорных конструкциях инженерных сетей.

Цель

Большую долю городского бюджета составляют затраты на обслуживание тепловых инженерных сетей. Так, теплотрассы подвержены подтоплениям дождевой водой, что приводит к коррозии классических металлических опор, а это, в свою очередь, влечёт затраты бюджета на устройства водоотводов и мероприятия по контролю состояния опор. Разработан новый тип опор (рис. 1), который позволяет сократить затраты на прокладку и обслуживание инженерных сетей [1].

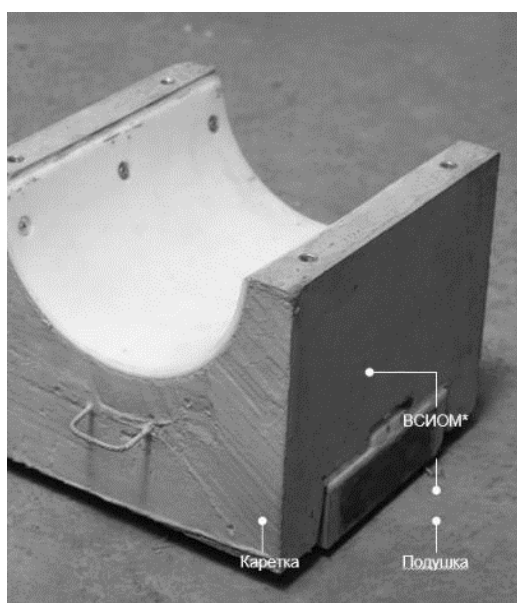


Рис. 1. Опора трубопровода

Опора стоит из подушки и поперечно-подвижной относительно неё каретки. Для облегчения прокладки трубы на цилиндрической части каретки закреплён полиэтиленовый материал. Более строгие требования предъявляются к контакту «подушка – каретка», поскольку при подтоплениях теплотрасс либо при прокладке инженерных сетей именно эта пара трения будет наиболее подвержена негативным воздействиям. В данной работе оценивалась применимость полиэтилена низкого давления ПЭ-100 в паре с таким же материалом и со сверхвысокомолекулярным полиэтиленом РЕ-500 в качестве направляющих в описанных выше опорах.

ПЭ-100 широко используется в промышленности, в т.ч. из этого материала изготавливают напорные трубы для сетей водоснабжения. РЕ-500 обладает высокой сопротивляемостью истиранию и сильно облегчает скольжение в сравнении с другими материалами, например, сталью.

Материалы и методы

Испытания выполнялись на машине трения возвратно-поступательного движения ПРУ-1 (ПО «Точприбор, ИМАШ РАН») (рис. 2). Количество циклов испытаний измерялось с помощью счётчика импульсов ОВЕН СИ-10, температура контролировалась измерителем-регулятором ОВЕН ТРМ-1 и датчиком ТСП-100П.



Рис. 2. Машина трения ПРУ-1

Амплитуда движения подвижного образца составила 80 мм (размах 160 мм), нагрузка на подвижный образец – $1,5 \text{ кгс/см}^2$. Скорость движения составила 13,3 см/сек (50 циклов/мин). Испытания выполнялись при комнатной температуре. Подвижные образцы устанавливались в тензометрический держатель под углом 90° к поверхности неподвижного образца для обеспечения максимального сопряжения поверхностей трения. Неподвижные образцы были изготовлены из ПЭ-100, подвижные – из ПЭ-100 и РЕ-500. Для каждой пары образцов проводилось 1000 циклов испытаний в режиме сухого трения, а также с добавлением непросеянного пескобетона М300 через каждые 100 циклов испытаний (рис. 3). После испытаний фиксировалась толщина образцов в местах максимального износа.



Рис. 3. Образцы, покрытые пескобетоном

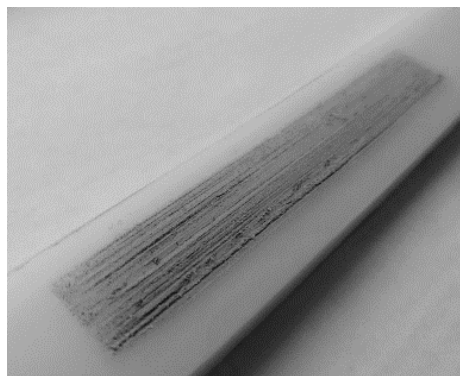


Рис. 5. Образец №4 неподвижный

Результаты и их обсуждение

Испытания были проведены со следующими сочетаниями образцов:

1. Неподвижный ПЭ-100 №1 + ПЭ-100 №I без смеси,
2. Неподвижный ПЭ-100 №2 + РЕ-500 №1 без смеси,
3. Неподвижный ПЭ-100 №3 + ПЭ-100 №II со смесью М300,
4. Неподвижный ПЭ-100 №4 + РЕ-500 №2 со смесью М300.

Результаты измерения толщины образцов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Линейный износ образцов

№	h до испытания, мм	h после испытания, мм
ПНД ПЭ-100 неподвижный		
1	9,45	9,35
2	9,50	9,40
3	9,40	9,00
4	9,00	8,50
ПНД ПЭ-100 подвижный		
I	11,85	11,55
II	11,85	11,05
СВМПЭ РЕ-500 подвижный		
1	11,10	11,05
2	11,10	11,00

Измерение весового износа оказалось несостоятельным по причине неустраняемого загрязнения пар №3 и 4 смесью М300. Образцы пар №3 и 4 имели ярко выраженные следы износа, фотографии образцов после испытаний приведены на рис. 4-7.

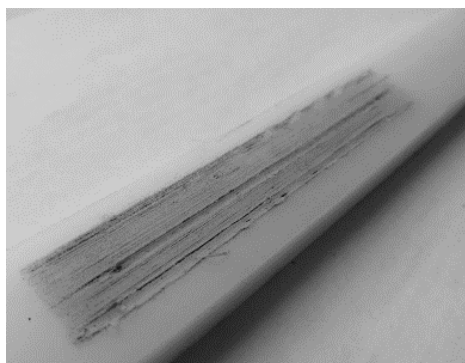


Рис. 4. Образец №3 неподвижный

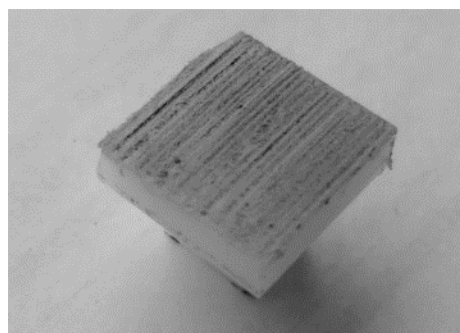


Рис. 6. Образец №II ПЭ-100 подвижный

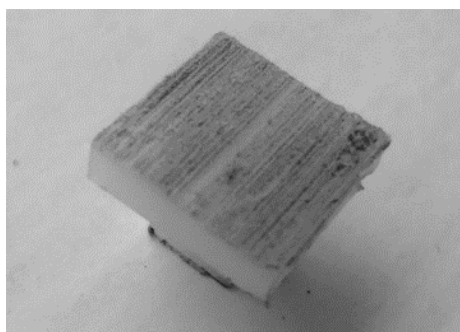


Рис. 7. Образец №2 РЕ-500 подвижный

Дополнительно было проведено 8000 циклов испытаний пары трения ПЭ-100 – ПЭ-100 в аналогичном режиме сухого трения, но при температуре 100°C. Измеренный линейный износ укладывался в диапазон допускаемой погрешности.

Установлено, что СВМПЭ РЕ-500 при применении в качестве направляющего материала в узлах трения опорных конструкций обеспечивает большую износостойкость по сравнению с ПНД ПЭ-100, и соответственно, обеспечивает более длинный жизненный цикл опоры.

1. Ростехполимер URL: <https://rostehpolymer.ru/opory-dlya-teplosetey/> (дата обращения: 20.10.2021).

ЦИФРОВОЙ ТЕРМОПАРНЫЙ ВАКУУММЕТР

О.И. Кулаков

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; kulakov@imash.ru

В статье описана разработка простого и недорогого термопарного вакуумметра с цифровым выходом для работы с широко используемыми манометрическими преобразователями PMT-2 / PMT-4M.

На территории бывшего СССР до сих пор широко распространены манометрические преобразователи PMT-2, работающие в диапазоне давлений $0,1 - 1 \cdot 10^{-3}$ Торр. Эти недорогие датчики не боятся прорыва атмосферы, а также могут быть легко очищены от загрязнений, которые могут возникать в процессе, допустим, осаждения покрытий. Кроме того, стеклянный корпус обеспечивает электрическую развязку вакуумметра и вакуумной камеры. Чаще всего эти датчики используются вместе с вакуумметрами типа ВИТ-2 и ВИТ-3, которые выполнены полностью на аналоговой схемотехнике. Кроме того, неприятной особенностью этих вакуумметров является необходимость перевода показаний стрелочного индикатора в мВ в единицы давления по градуировочной кривой. Существуют современные полностью цифровые вакуумметры, предназначенные для работы с датчиками PMT [1, 2], однако, они отличаются достаточно высокой стоимостью, что может быть проблемой при ограниченных бюджетах на любительские проекты или простые лабораторные установки в университетах. Существуют любительские конструкции подобных вакуумметров [3], однако, обладающие некоторыми недостатками, например, невозможностью регулировки тока накала. Целью данной работы являлась разработка простого компактного вакуумметра для замены термопарной части вакуумметров типа ВИТ, но с возможностью отображения текущего давления в цифровом виде и с возможностью записи изменения давления на компьютер, что является актуальным для некоторых техпроцессов, например, для атомно-слоевого осаждения покрытий [4].

Принцип работы датчика заключается в том, что ЭДС, развиваемая установленной в нём термопарой, определяется температурой нагревателя (рис. 1).

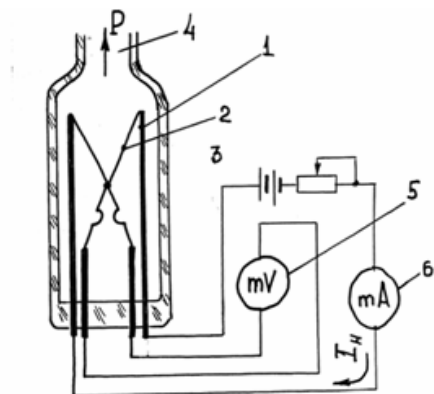


Рис. 1. Условная схема работы преобразователя

При постоянстве тока накала термо-ЭДС определяется объемом газа в исследуемом объеме, поскольку изменение температуры нагревателя определяется теплопроводностью окружающего газа. При понижении давления теплопроводность газа уменьшается, увеличивается температура нагревателя, соответственно увеличивается ЭДС термопарного преобразователя. По известной зависимости термо-ЭДС от давления определяется давление в исследуемой системе. Полностью аналогичную конструкцию имеет датчик PMT-4M, отличающийся от PMT-2 металлическим корпусом.

Источник питания накала позволяет регулировать его в диапазоне 90 – 170 мА. Источник питания накала состоит из трансформатора Т1, диодного моста VD1, конденсаторов C1-C5, миллиамперметра МА, стабилизатора напряжения DA1, стабилизатора тока DA2, резисторов R1 и R2. Для контроля наличия напряжения на выходе стабилизатора DA1 на плате установлены светодиод VL1 и резистор R3. Для контроля наличия сетевого напряжения установлена неоновая лампа HL1. Для питания миллиамперметра МА установлен дополнительный импульсный блок питания PS1.

Цифровая часть вакуумметра состоит из АЦП ADS1115, экрана мод. 1604 с конвертером i2c и микроконтроллерной платы Arduino Nano V3. АЦП работает в дифференциальном режиме.

Схема печатной платы устройства приведена на рис. 2.

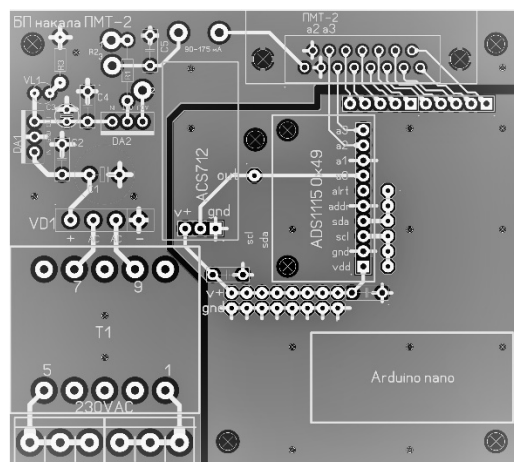


Рис. 2. Печатная плата

Подключение преобразователя осуществляется экранированным кабелем к разъему DB-15F.

После включения вакуумметра и его выхода на

установившийся режим работы необходимо выставить потенциометром рабочий ток преобразователя.

Градуировочная кривая ПМТ-2 / ПМТ-4М была оцифрована и записана в прошивку микроконтроллера. Градуировочные кривые приведены на рис. 3.

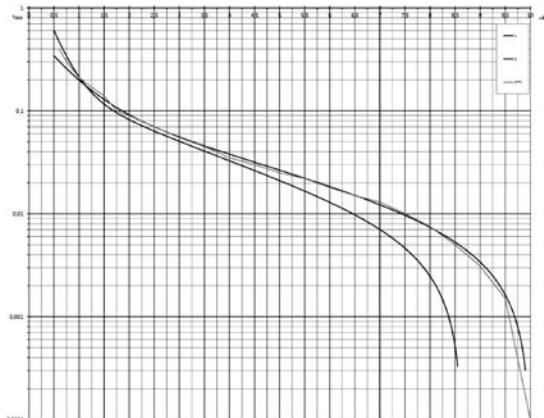


Рис. 3. Градуировочные кривые

Текущее давление (Торр) и напряжение термопары (мВ) отображаются на экране цифровой части вакуумметра. Эти данные также передаются на компьютер по USB-кабелю через виртуальный COM-порт. Фотография вакуумметра приведена на рис. 4.



Рис. 4. Вакуумметр

Изготовленный вакуумметр используется для наладки вакуумных испытательных стендов, а также на установке для атомно-слоевого осаждения покрытий. Измеряемые величины давлений соответствуют измеренным с помощью вакуумметра ВИТ-2.

1. Агеев, А. С. Цифровой комбинированный ионизационно-тепловой вакуумметр Мерадат ВИТ19 ИТ1 / А. С. Агеев, Д. А. Воронов, Д. В. Сыпачев // Вакуумная техника и технология. – 2010. – Т. 20. – № 2. – С. 129-132.
2. Активный термопарный вакуумметр АТВ-2. Руководство по эксплуатации. - Томск: 2007.
3. Вакуумметр для манометрического преобразователя ПМТ-2 // URL: <https://habr.com/ru/post/406583/> (дата обращения: 2021-09-17).
4. Li, Ming-yen & Chang, Yung-Yuan & Wu, Hsiao-Che & Huang, Cheng-Sung & Chen, Jen-Chung & Lue, Jen-Lang & Chang, Shieh-Ming. (2007). Effect of Process Pressure on Atomic Layer Deposition of Al₂O₃. Journal of The Electrochemical Society. 154. H967-H972. 10.1149/1.2778861.

РАСЧЕТ ЧЕРВЯЧНЫХ ПЕРЕДАЧ С УЧЁТОМ ИЗМЕНЕНИЯ ИХ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Е.М. Кулешова¹, С.А. Поляков^{1,2}, Л.И. Куксенова^{2,1}, А.В. Медовщиков¹

¹Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия;
kuleshova.em@mail.ru

²Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия

В работе показана взаимосвязь между ростом контактных напряжений возникающих в червячной передаче (ЧП) и ростом динамических нагрузок, возникающих в связи с износом. Получены зависимости вращающего момента на червячном колесе от времени с учетом роста коэффициента динамичности при использовании разных смазочных материалов (СМ).

Цель

Основными причинами выхода из строя ЧП являются заедание и износ. Как и при заедании, так и в случае износа основным фактором, влияющим на процесс разрушения, является наличие контактных напряжений [1]. Поэтому для ЧП целесообразно производить расчет усталостной прочности по контактным напряжениям. По мере изнашивания в области, где соотношение значения износа с модулем зубьев превышает определенное значение, коэффициент динамичности монотонно растет [2]. Данное явление обусловлено увеличением амплитуды колебаний вращающих моментов на быстроходном и тихоходном валах по мере роста нагрузки. Таким образом, рост коэффициента динамичности и рост величины износа могут приводить к росту контактных напряжений, и соответственно, к заеданию. Как показывают исследования, использование пленкообразующих добавок приводит к снижению скорости роста динамических нагрузок и, следовательно, к снижению роста контактных напряжений. Условие контактной прочности ЧП описывается выражением (1) [3]

$$\sigma_H = \frac{5400q}{z_2} \sqrt{\left(\frac{z_2 + q}{a_w q}\right)^3 T_2 K_{H\beta} K_{H\alpha}} \leq [\sigma]_H, \quad (1)$$

Где σ_H – расчетное контактное напряжение, $[\sigma]_H$ – допускаемое контактное напряжение. T_2 – вращающий момент на колесе, $K_{H\beta}$ – коэффициент концентрации нагрузки, $K_{H\alpha}$ – коэффициент динамичности нагрузки, a_w – межосевое расстояние, q – коэффициент диаметра червяка, z_2 – число зубьев червячного колеса.

Из соотношения (1) следует, что контактное напряжение зависит от вращающего момента на червячном колесе и коэффициента динамичности нагрузки. В первом приближении коэффициент $K_{H\alpha}$ принимают равным единице. Но как было упомянуто выше, по мере роста износа, коэффициент динамичности растет, и может превышать рекомендуемые значения.

Таким образом, **целью** данной работы является – определение зависимости вращающего момента на червячном колесе от времени с учетом роста коэффициента динамичности при использовании минерального и минерального масла с добавкой «Стрибойл» при проведении стендовых испытаний червячного редуктора.

Основная часть

Для анализа динамики ЧП предлагается модель колебаний, в которой функция кинематических погрешностей заменена рядом Фурье, описывающим импульсы, испытываемые в крутильном направлении червячным валом при взаимодействии погрешностей изготовления по модели, предложенной в [4]

$$J_2 \frac{d^2 \varphi_2}{dt^2} + C_f \varphi_2 = \left[F \left(\omega_0 - \frac{d\varphi_2}{dt} \right); K \frac{d\varphi_2}{dt} \right] d_1 + \\ + \left(F_0 \sum F_k [\Phi(\delta \varphi_k)] \cos \omega_k t \right) d_1,$$

где φ_2 – угол поворота зуба червячного колеса в направлении приложения окружной силы на червяке (в плоскости, перпендикулярной оси червяка); J_2 – приведенный момент инерции тихоходного вала; ω_k – зубцовая частота; ω_0 – частота вращения вала электродвигателя; d_1 – делительный диаметр червяка; C_f – жесткость зуба червячного колеса в направлении приложения окружной силы на червяке; F – функция изменения силы трения в связи с отношением угловой скорости вала электродвигателя ω_0 и скорости поворота зуба червячного колеса $d\varphi_2/dt$; $K d\varphi_2/dt$ – демпфирующий член; F_k – силовые составляющие, разложенные по соответствующим гармоникам.

Для анализа амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) использовался метод быстрого преобразования Фурье. Анализ зависимости амплитуды момента на быстроходном валу для доминирующей частоты от тормозного момента позволяет построить аналитические зависимости коэффициента динамичности от нагрузки (2) [1].

$$K_d = 1 + \frac{\Delta T}{T_H}, \quad (2)$$

где T_H – номинальный вращающий момент, ΔT –

величина динамической надбавки момента.

На (рис. 1) показаны графики зависимости коэффициента динамичности быстроходного вала от тормозного момента для разных СМ [5].

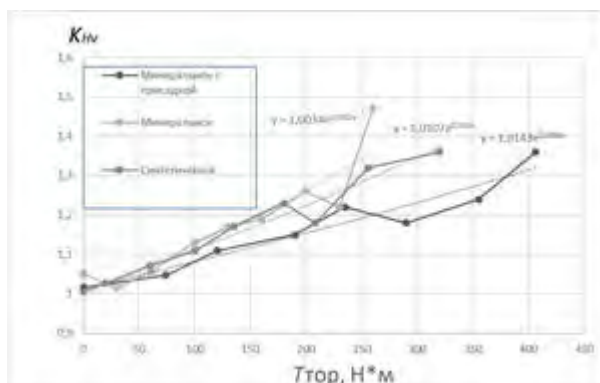


Рис.1. Зависимость коэффициента от тормозного момента при разных составах СМ.

Из графиков видно, что по мере повышения антифрикционных свойств СМ скорость роста коэффициента динамичности быстроходного вала ЧП снижается. Таким образом, на основе графиков, показанных на (рис. 1) были получены зависимости вращающего момента на червячном колесе от времени с учетом роста коэффициента динамичности при использовании разных СМ. На (рис. 2) и на (рис.3.) показаны графики зависимости вращающего момента на червячном колесе от времени при использовании минерального масла и минерального масла с добавкой «Стрибойл», соответственно, где T_2 – средние значение момента, $T_2 \min$ – минимальные значение момента и $T_2 \max$ – максимальное (соответствующие размаху колебаний момента).

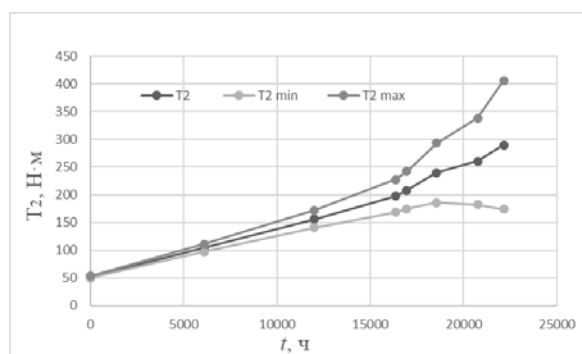


Рис.2. Зависимость вращающего момента на червячном колесе от времени при использовании минерального масла.

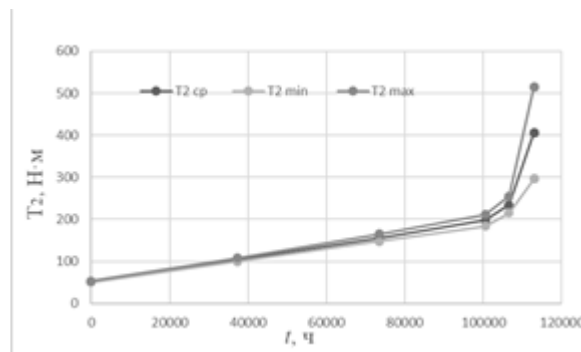


Рис.3. Зависимость вращающего момента на червячном колесе от времени при использовании минерального масла с добавкой «Стрибойл».

Анализируя (рис. 2) и (рис. 3), можно отметить, что в соответствии со скоростью роста коэффициента динамичности по мере роста нагрузки, размах колебаний момента на червячном колесе увеличивается, что согласно формуле (1) приводит к росту контактных напряжений и соответственно к увеличению вероятности возникновения заедания.

Необходимо отметить, что при введении пленкообразующей добавки (рис. 3) амплитуда колебаний момента снижается, таким образом, увеличивается время безотказной работы.

Заключение

Полученные графики зависимости коэффициента динамичности от нагрузки и зависимости вращающего момента на червячном колесе от времени позволят проводить более точный расчет усталостной прочности ЧП по контактным напряжениям. Как подтвердили экспериментальные данные, для снижения динамических нагрузок и, как следствие, контактных напряжений могут быть использованы пленкообразующие добавки.

1. Детали машин. Под ред. О.А. Ряховского. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 520 с.
2. Андриенко Л.А., Вязников В.А. Ресурс работы червячной передачи по критерию изнашивания // Известия вузов. Машиностроение. – 2011. – №4. – С.3–6.
3. Часовников Л.Д. Передачи зацеплением. М.: Машиностроение. 1969, 488 с.
4. Берестнев О.В., Гоман А.М., Ишин Н.Н. Аналитические методы механики в динамике приводов. Минск, Наука и техника, 1992, 238 с.
5. Кулешова Е.М., Поляков С.А. Оценка ресурса червячных передач с учетом изменения интенсивности изнашивания и скорости роста коэффициента динамичности при использовании пленкообразующих добавок. // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2020. №10. С. 460-465.

ВЛИЯНИЕ МОДИФИКАЦИИ УГЛЕРОДОСОДЕРЖАЩЕГО МАТЕРИАЛА НА КОЭФФИЦИЕНТ ТРЕНИЯ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

А.И. Лукьянов

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; alex0072@rambler.ru

Работа посвящена высокотемпературным трибологическим испытаниям углеродосодержащего материала при трении по стали 40X13 в температурном диапазоне от +20 до +700 °С в атмосферных условиях. Модифицированная поверхность трения материала "Хардкарб-ТП" в парах селена и политетрафторэтилена в паре со сталью 40X13 улучшает антифрикционные свойства поверхности трения. В диапазоне температур +300 °С...+500 °С коэффициент трения модифицированной поверхности "Хардкарб-ТП"+Se-ПТФЭ при нагрузке 0,67 МПа и скорости 0,05 м/с изменяется в диапазоне 0,20...0,24. При температуре +500 °С и скорости 0,05 м/с коэффициент трения модифицированной поверхности меньше на 22%.

Введение.

Работоспособность узлов трения, работающих при высоких температурах, зависит от конструктивных особенностей, применяемых материалов и используемых смазочных материалов и покрытий. При работе в узле трения повышается энерговыделение, которое влечет за собой увеличение коэффициента трения и износа. Снижать коэффициент трения в узле можно путем повышения антифрикционности пары трения, используя материалы, имеющие в паре трения более низкий коэффициент трения [1]. Для повышения антифрикционности поверхностей трения, уменьшения коэффициента трения в условиях высоких температур используют твердые смазочные покрытия [2] или же в структуру материала вводят специальные антифрикционные добавки [3]. При работе в условиях высоких температур большой интерес представляют углеродосодержащие композиционные материалов (УУКМ) [4]. Материалы УУКМ имеют низкую плотность, хорошие характеристики прочности и стойкости к адгезионному схватыванию. Триботехнические свойства УУКМ при высоких температурах изучены мало [5].

Цель работы - изучить влияние модификации поверхности трения углеродосодержащего материала на коэффициент трения при высоких температурах при трении по стали 40X13.

Материалы и оборудование.

Модификация поверхности трения проводилась на материале марки "Хардкарб-ТП" [6]. В паре трения был использован материал контртела – сталь 40X13. Трибологические испытания проводились на высокотемпературном стенде ВТМТ-1000. Стенд обеспечивает режим трения образцов по схеме «диск-палец» в интервале температур от + 20 до +700 °С при нормальной нагрузке 0,67 МПа [7]. Результаты испытаний по данной схеме образцов можно распространять на другие схемы подшипников скольжения. Температура образцов при испытаниях контролировалась термопарой хромель-алюмель с регистрацией на приборе ZET 7120. Линейная

скорость устанавливалась дискретно и составляла 0,05 м/с. В процессе испытаний температура на поверхности трения и момент трения измерялись непрерывно. Испытания проводились в нормальных атмосферных условиях.

Результаты эксперимента.

Для повышения антифрикционных свойств углеродосодержащего материала производилась модификация поверхности трения материала "Хардкарб-ТП". Материал "Хардкарб-ТП" имеет пористую структуру, поэтому для изменения структуры поверхности трения производили насыщение поверхности трения антифрикционными материалами в защитной камере. Обработка проводилась в среде селена и политетрафторэтилена (Se-ПТФЭ) при температуре 810 °С. Испытания проводились на материалах "Хардкарб-ТП" и "Хардкарб-ТП"+Se-ПТФЭ. По результатам испытаний была установлена зависимость коэффициента трения от температуры при нагрузке 0,67 МПа и скорости 0,05 м/с образцов из материалов "Хардкарб-ТП" и "Хардкарб-ТП"+ Se-ПТФЭ, рис. 1. При увеличении температуры от +100 °С для материала "Хардкарб-ТП", а для материала "Хардкарб-ТП"+Se-ПТФЭ от +200 °С коэффициент трения растет. В диапазоне температур +300 °С...+500 °С коэффициент трения модифицированной поверхности "Хардкарб-ТП"+Se-ПТФЭ при нагрузке 0,67 МПа и скорости 0,05 м/с изменяется в диапазоне 0,20...0,24. При температуре +500 °С и скорости 0,05 м/с коэффициент трения модифицированной поверхности меньше на 22%.

Выводы.

Модифицированная поверхность трения материала "Хардкарб-ТП" в парах селена и политетрафторэтилена в паре со сталью 40X13 улучшает антифрикционные свойства поверхности трения. В диапазоне температур +300 °С...+500 °С коэффициент трения модифицированной поверхности "Хардкарб-ТП"+Se-ПТФЭ при нагрузке 0,67 МПа и скорости 0,05 м/с изменяется в диапазоне 0,20...0,24. При температуре +500 °С и

скорости 0,05 м/с коэффициент трения модифицированной поверхности меньше на 22%.

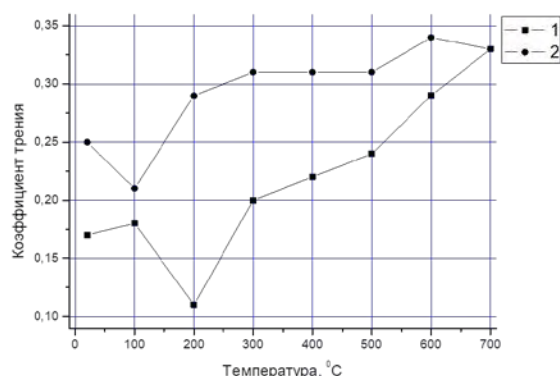


Рис.1. Зависимость коэффициента трения от температуры при нагрузке 0,67МПа и скорости 0,05 м/с материалов: 1- "Хардкарб-ТП"+Se-ПТФЭ, 2-"Хардкарб-ТП"

1. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: в 3-х т.: Т.2–8-е изд., перераб. и доп. Под ред. И.Н. Жестковой. – М.: Машиностроение, 2001. – 912 с.
2. Лобова Т.А., Марченко Е.А. Влияние состояния основы на структуру и трибологические характеристики покрытий диселенида молибдена (MoSe₂)// Материаловедение. 2019. № 11. С. 9-13.
3. Al-Saadi D A Y, Pershin V F, Salimov B N and Montaev S A 2017 Modification of graphite greases graphene nanostructures. Journal of Friction and Wear. Т. 38. № 5. С. 355-358.
4. Новые материалы. Колл. авторов. Под научной редакцией Ю.С. Карабасова. – М: МИСИС. – 736 с.
5. Алисин В.В., Рошин М.Н., Лукьянов А.И., Воронцов В.А., Богачев В.А., Маркачев Н.А. Разработка и исследование узлов трения, работающих при высоких температурах, применительно к космическим аппаратам// Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. –2019. № 1.– С. 61-65.
6. Roshchin M. N., Krivosheev A. Yu., Mishanova V. G. Carbon-based materials in friction units at high temperatures. Journal of Physics: Conference Series 1679 (2020) 042099.
7. Roshchin M. N., Markachev N. A., Bogachev V. A. Tribology of carbon-containing materials in the carbon dioxide environment at high temperatures. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 862 (2020) 062063.

МОДЕЛИРОВАНИЕ УГЛОВОЙ ЖЕСТКОСТИ ПОДШИПНИКОВ ПРИ ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ В ЗАЗОРЕ

А.В. Лутьянов, К.А. Сухоруков, Н.С. Баранова

Российский технологический университет «МИРЭА», Москва, Россия

В статье рассмотрен вопрос моделирования цилиндрических оболочек при их работе в условиях сжатого воздуха, что становится основой для расчета жесткости технологической системы при работе в условиях перепада давлений в технологической системе.

Для постановки задачи моделирования рассмотрим задачу устойчивости тонкой цилиндрической свободно опертой оболочки, нагруженной внешним аэростатическим давлением [1]. Теоретические основы газовой теории смазки позволяют смоделировать движение сжатого воздуха в опорах устройств или приспособлений и спрогнозировать оптимальные значения и геометрических характеристик опор и величины смазочного зазора. Для получения условий устойчивости рассмотрим полубезмоментную теорию цилиндрических оболочек рисунок 1.

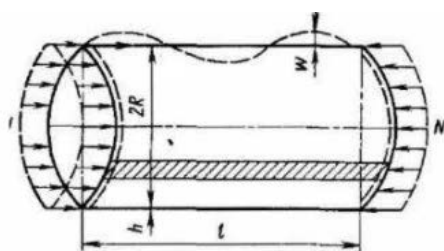


Рисунок 1 – Цилиндрическая борштанга в аэростатических опорах

Согласно кинематическим допущениям этой теории, окружные деформации ε_y и деформации сдвига γ_{xy} центральной поверхности равны нулю:

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{w}{R} = 0, \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = 0. \quad (1)$$

Эти два уравнения, связывающие три перемещения (u , v , w), позволяют сократить число неизвестных и ввести функцию Φ (функцию перемещений), что :

$$u = \frac{\partial \Phi}{\partial x}, v = -\frac{\partial \Phi}{\partial y}, w = R \cdot \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2}. \quad (2)$$

Для свободно установленной поверхности в виде цилиндрической оболочки на опоры в приспособлениях зададим аппроксимацию функции Φ в виде:

$$\Phi = \Phi_{\min} \cdot \sin \bar{m}x \cdot \sin \bar{n}y, \quad (3)$$

где $\bar{m} = \frac{m\pi}{l}$, $\bar{n} = \frac{n}{R}$, $m = 1, 2, \dots$ – число

полуволн образующей, $n = 2, 3, \dots$ – число волн в окружном направлении.

Тогда перемещения будут выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} u &= \Phi_{\min} \cdot \bar{m} \cdot \cos \bar{m}x \cdot \sin \bar{n}y, \\ v &= -\Phi_{\min} \cdot \bar{n} \cdot \sin \bar{m}x \cdot \cos \bar{n}y, \\ w &= -R \cdot \bar{n}^2 \cdot \sin \bar{m}x \cdot \cos \bar{n}y. \end{aligned} \quad (4)$$

Согласно полубезмоментной теории, необходимо определить только ε_x и ae_y .

Воспользовавшись соотношениями, получим:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} = -\Phi_{\min} \cdot \bar{m}^2 \cdot \sin \bar{m}x \cdot \sin \bar{n}y, \quad (5)$$

$$ae_y = \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial v}{\partial y} = R \cdot \frac{\partial^4 \Phi}{\partial y^4} + \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2}. \quad (6)$$

Перед формулированием вариационного варианта задачи устойчивости при расчете жесткости, следует учесть, что мы имеем дело с постоянным давлением сжатого воздуха. Уточненные поверхностные силы остаются всегда нормальными к деформированным поверхностям и при переходе к смежному равновесному состоянию дополнительно совершают работу второго порядка малости на изменение объема [2]. Для случая внешнего давления на аэростатических опорах эту работу с учетом полубезмоментной теории можно представить в виде двойного интеграла по поверхности:

$$\Delta A_p = \frac{1}{2} \cdot \int_0^{2\pi R} \int_0^l p v \mathcal{G}_y dx dy. \quad (7)$$

Этот результат легко получить, если сравнить положительную и отрицательную площади, которые образует элемент MN (длиной dy), если его как жесткое целое переместить на v и повернуть на угол $\mathcal{G}_y$ [3].

Тогда равномерное распределение давления в расчетном сегменте (или прогнозируемый закон распределения давления по площади) имеет вид (рисунок 2):

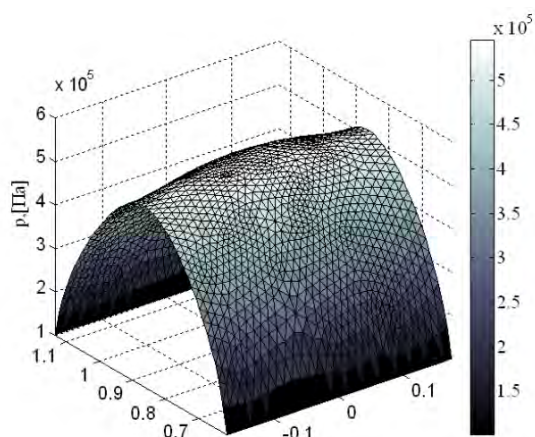


Рисунок 2 – Распределение давления в расчетном сегменте

Это выражение показывает, что наименьшее давление (по числу полувольт в осевом направлении) совпадает с вариантом, когда $m = 1$. Тогда

$$p = \left(\frac{\pi R}{l} \right)^4 \cdot \frac{Eh}{R} \cdot \frac{1}{n^4(n^2 - 1)} + \frac{D(n^2 - 1)}{R^3}. \quad (8)$$

Предельное давление, при котором происходит потеря устойчивости и снижается жесткость, определяют из минимизацией значения p по целому числу волн n :

$$p_{кр} = \min_{n \geq 2} (p). \quad (9)$$

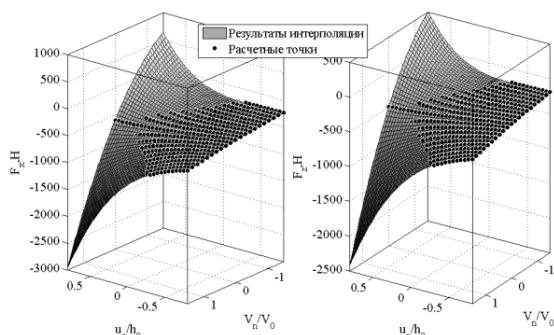


Рисунок 3 – Аппроксимация силовых характеристик

Результаты интерполяций проведенных исследований показывают, что зависимости уровней давлений в смазочных зазорах и их влияние на жесткость инструментов (борштанг) практически идентичны. (рисунок 3).

Выводы.

Данные моделирования постоянного давления в опорах подшипниках позволили определить жесткость борштанги и ее основные кинематические показатели, повысить надежность технологических операций и провести экспериментальное обоснование применяемых решений.

1. Эксплуатационные характеристики газовых опор высокоскоростных шпиндельных узлов/ А.В. Космынин [и др.] М.: Издательство Академия Естествознания, 2005. 218 с.

2. Xuhong Li., Hejun Du., Bo Liu; Gih Keong Lau. Numerical simulation of slider air bearings based on a mesh-free method for HDD applications. Microsyst Technol. 2005. №11. Springer-Verlag Publishing. 797-804.

3. Эксплуатационные характеристики газовых опор высокоскоростных шпиндельных узлов/ А.В. Космынин [и др.] М.: Издательство Академия Естествознания, 2005. 218 с.

МЕХАТРОННАЯ КОЛЕБАТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ХАРАКТЕРИСТИК ТРЕНИЯ

С.И. Малафеев, А.И. Копейкин, Д.А. Павлов

Владимирский государственный институт имени А.Г. и Н.Г. Столетовых, «ВлГУ», Владимир, Россия

В докладе рассматривается частотный метод исследования момента трения M_c подшипниковых опор механических подсистем (МП) приводов, основанной на измерении механических и электрических переменных в режиме незатухающих механических колебаний в колебательной электромеханической системе (КЭМС), и приведены её технические средства. Представлены расчетные зависимости M_c по результатам измерений на опытной установке при разных частотах.

Введение

Широко распространенными изделиями в машиностроении являются подшипники и подвижные узлы сопряжения. При современных требованиях к интенсификации приводных систем (ПС) многих объектов очевидна необходимость улучшения качества таких ПС, которое достижимо повышением показателей надежности, в частности: долговечности, безопасности, снижению риска в работе механизмов, машин, разнообразного технологического оборудования механических подсистем (МП). Указанные показатели зависят от многих факторов. Но относительно сложной и неопределенной при описании МП остается составляющая момента сил сопротивления движения $M_{сд}$ – момент сил трения M_c , особенно в неустановившихся режимах.

$M_{сд}$ является случайным в фундаментальном законе движения д. Аламбера интерпретируемого в наиболее общей и широко используемой форме как [1]

$$M(t) - M_{сд} = M_j(t), \quad (1)$$

где $M(t)$, $M_j(t)$ электромагнитный и динамический моменты.

Равенство (1) и уравнение электромеханической характеристики электродвигателя приводов [1] устанавливают математическую связь между функциями $M(t)$ и скоростью $\omega(t)$ во всех режимах работы.

Во многих [2,3] сила трения, в том числе динамики (кинетическое трение), как дополнительный нагрузочный (разрушающий) фактор, игнорируется. Однако эксперименты показывают, что эквивалентные напряжения на контакте (в частности подшипников) даже со смазываемыми материалами определяются не принятыми соотношениями. Вклад момента M_c в деформирование втулок подшипников при переменной скорости в десятки раз больше, чем при расчете по четвертой теории прочности.

Сущность принятого решения

Исследование и расчет момента трения основывается на измерении механических и электрических параметров в колебательной электромеханической системе (КЭМС) с управляемой «электрической» пружиной [4–8].

Возможности КЭМС для исследования трения во многом зависят от её структуры рис.1.

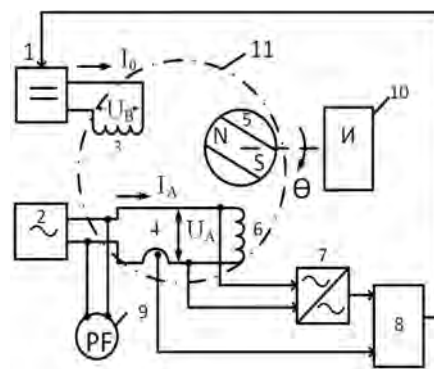


Рис.1. Колебательная электромеханическая система

На рис.1. обозначено: 1 – регулируемый источник постоянного тока; 2 – усилитель мощности (УМ); 3 и 6 – первая В и вторая А обмотки статора синхронного двигателя (СД); 4 – датчик тока; 5 – ротор СД; 7 – датчик напряжения; 8 – блок определения частоты колебаний в исследуемой области; 9 – частотометр; 10 – испытуемое изделие; 11 – приводной двигатель КЭМС.

Как показано в работе [9], уравнение динамики для установившихся периодических колебаний имеет вид:

$$J\ddot{\theta} + M_c + C_3\theta = M_{доб}, \quad (2)$$

где J – момент инерции подвижной части КЭМС;

C_3 – жесткость «электрической пружины»;

M_c – момент сопротивления;

θ – угол поворота ротора СД;

$M_{доб}$ – добавочный, вносимый момент для покрытия механических потерь.

Параметр C_3 для исследованной конструкции синхронного двигателя зависит от амплитуды колебаний ротора θ_m по

уравнению $C_\theta = 0,16K_\theta\theta_m^2$, где K_θ – квазиупругий момент. Для создания незатухающих механических колебаний необходима автоматическая компенсация M_C (добавочный момент), формируемый синхронным двигателем с помощью управляемой колебательной системы по выражению:

$$M_T = J_u \frac{2a'^3 i_A A^2 - a' A' (1 + a'^2 i_A^2)}{(1 + a'^2 i_A^2)^2}, \quad (3)$$

где J_u – момент инерции колеблющихся масс; $a' = \frac{W_{AO}}{I_0 W_{B-C}}$, W_{AO} и W_{B-C} соответственно числа витков фазы АО и обмотки В – С; I_0 – постоянный ток в обмотке В – С; $A = i_A'$ – производная от тока i_A в фазе АО; A' – вторая производная от тока i_A [10]. Представленная формула (3) и лежит в основе излагаемого

подхода. Уравнение (3) позволяет рассчитать физические процессы в механических подсистемах приводов, уточнить расчет их основных параметров и характеристик, связанных с действием M_C как в установившихся, так и динамических режимах.

Экспериментальная проверка

Колебательная электромеханическая система рис.1. в разработанной экспериментальной установке представлена на рис.2.

Поскольку точность расчета момента M_C во многом зависит от достоверности измерения угла поворота ротора синхронного двигателя, то его определение проводится с помощью устройства, функциональная схема которого показана на рис.3.

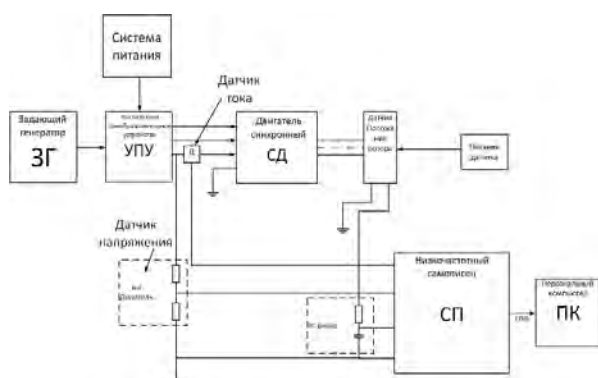


Рис.2. Функциональная схема

Достоинством этого устройства являются относительно большая точность определения угла положения ротора, отсутствие накапливаемой ошибки в процессе реверсирования, удобство обработки данных (наличие цифрового интерфейса ШИМ или I2C), отсутствие нагрузки на вал двигателя. Для аттестации датчика использована вычислительная платформа Arduino Uno из-за возможности прямого подключения датчика, удобства написания программы для снятия и обработки данных. Результаты экспериментальных исследований M_C на основе измеренных динамических переменных КЭМС и расчет по ним зависимости $M_C \omega_M$ представлены на рис.4.

Вывод

Полученные теоретические и опытные результаты, мехатронной колебательной системы для идентификации характеристик трения,



Рис.3. Функциональная схема измерителя угла поворота θ

указывают на расширение областей применения, изложенного способа в исследовании показателей трения механических подсистем различных приводов:

- определять в каждом конкретном случае эквивалент вязкого трения β_θ по методу энергетического баланса;
- уточнять диапазон изменения параметра демпфирования ρ ;
- проводить безразборную диагностику триботехнических характеристик не только подшипниковых опор, но и механических подсистем многих приводов. А это способствует увеличению долговечности и безопасности работы различных механизмов, машин, объектов. Кроме того, реализация изложенного подхода в исследовании трения установкой рис.2. повышает ее надежность и точность определения M_C в различных режимах работы механических подсистем приводов.

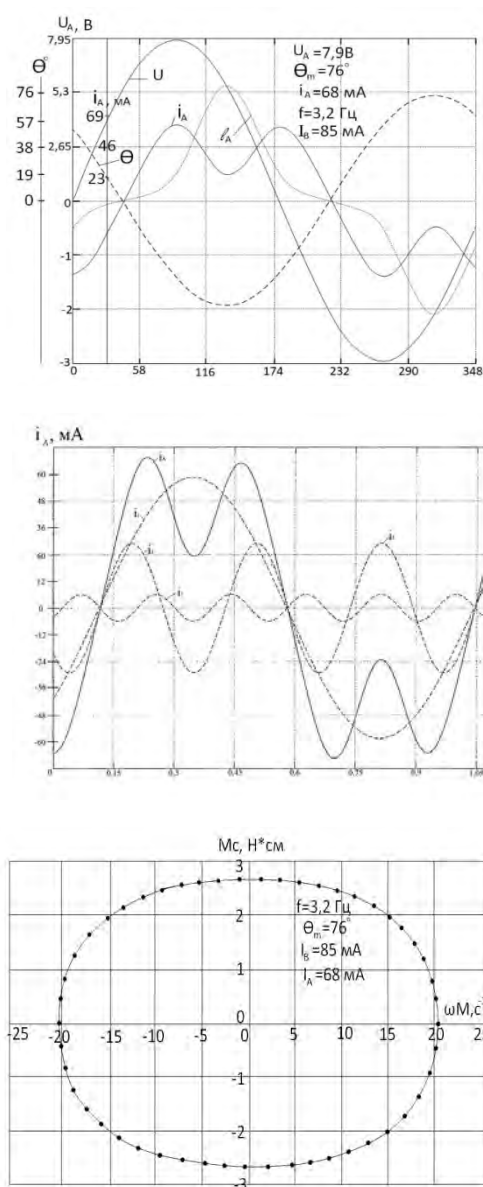


Рис.4а. Результаты экспериментальных исследований

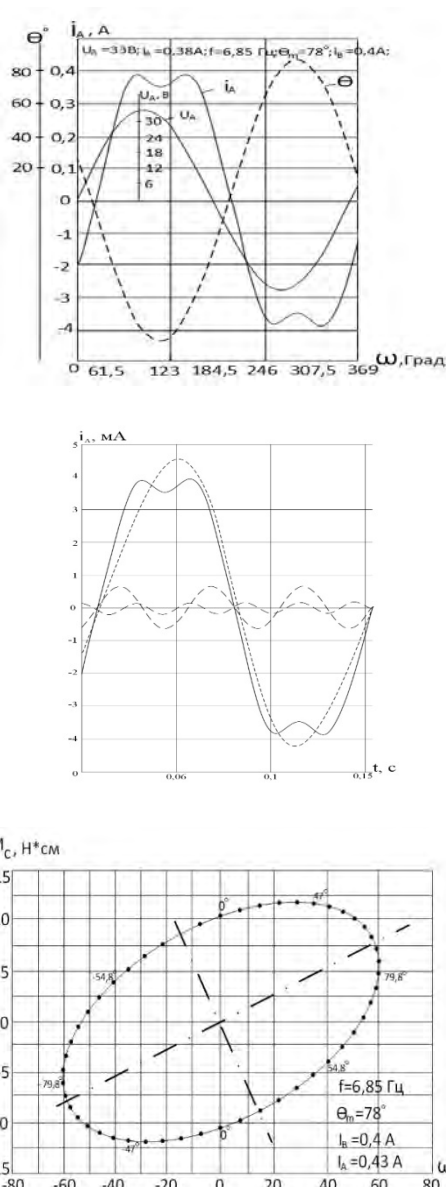


Рис.4б. Результаты экспериментальных исследований

1. В.Н. Ключев. Теория электропривода: Учебник для вузов.-М.: Энергоиздат,2001.- 600с .
2. Трибология-машиностроению: Труды XI Межд. науч.-технич. конф. - М.: Институт компьютерных исследований, 2016.-290с.
3. Научные труды V Межд. науч. конф «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении».- М. ИД «Спектр», 2017.- 324с.
4. Копейкин А.И., С.И Малафеев. Управляемые электромеханические колебательные системы: Учебное пособие; Изд-во «Пасад», Владимир, 2001- 128с.
5. Малафеев С.И., Копейкин А.И., Данилов Е.В. Диагностика и оценка ресурса пар трения приводных систем // Контроль, диагностика, 2013, №7.- с.59-62.
6. Malafeev S.I., Kopeykin A.I., Malafeev S.S. Investigation of the characteristics of friction pairs in the oscillation regime: the method and implementation of the the mechatronic oscillatory system. – Proceedings of BALTTTRIB'2017 / ed. by J. Padgurskas. 2017. – p. 137 – 142.
7. Малафеев С.И., Копейкин А.И., Малафеев С.С. Анализ

- момента сопротивления при колебаниях в электро-механической системе. Труды XII Межд. науч.-технич. конф. «Трибология – машиностроению». – М.: Институт компьютерных исследований, 2018. – С. 309 – 312.
8. Малафеев С.И., Копейкин А.И. Надежность технических систем. Примеры и задачи. М. – СПб. – Краснодар, Издательский центр «Лань», 2012. – 320 с.
9. С.И. Малафеев, А.И. Копейкин. Колебательные системы для идентификации параметров механических компонентов приводов. Научные труды IV-й Межд. науч. конф. «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении». - М. ИД «Спектр», 2015.-с.158-160
10. А.И. Копейкин, С.И. Малафеев, Н.А. Павловская. Экспериментальное исследование потерь в подшипниках приводных систем. Материалы III Всероссийской научно-технической конференции «Информационно-измерительные и управляющие системы военной техники», Владимир, 14-16 ноября 2012г. – М.: Изд-во РАН, 2012. – с.110-114;

КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ И РЕСУРСА КОМПОНЕНТОВ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ С ПОМОЩЬЮ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ

А.А. Малафеева¹ С.С. Малафеев²

¹Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, Россия,
amalafeeva@rambler.ru

²Владимирский политехнический колледж, Владимир, Россия

Выполнен анализ особенностей моделей мехатронных систем для построения цифровых двойников. Рассмотрены представления компонентов мехатронных систем, воспроизводящие их различные свойства на разных этапах жизненного цикла изделия. Для оценивания степени накопления повреждений и прогнозирования остаточного ресурса электрических, механических и электронных компонентов исследованы модели, отражающие изменения эксплуатационных параметров, нагрузки и воздействия окружающей среды.

Введение

Обеспечение надежной, безопасной и эффективной эксплуатации современных технических систем в течение всего жизненного цикла опирается на активное использование достижений информационных технологий [1–3]. Априорный анализ надежности компонентов мехатронных систем по известным характеристикам надежности элементов имеет приближенный характер и не позволяет получить адекватные оценки текущего состояния оборудования, в частности остаточного ресурса. В условиях быстрого изменения элементной базы средств управления, отсутствия адекватной статистики отказов и ограниченных ресурсов времени и средств на проведение испытаний эффективным способом становится экспериментальное определение показателей надежности в процессе эксплуатации с использованием цифровых двойников [3–6].

В настоящей работе выполнен краткий анализ моделей компонентов мехатронных систем для реализации цифровых двойников, обеспечивающих контроль состояния и оценивание остаточного ресурса.

Цифровые двойники в управлении жизненным циклом мехатронных систем

Цифровой двойник – это сформировавшаяся в результате перехода количественных накоплений инноваций новая технология автоматического контроля и управления объектами и процессами различного назначения. В общем случае цифровой двойник – это система, состоящая из компьютерного представления моделей физического объекта, интерфейса между физическим объектом и моделью, пользовательского интерфейса и информационного ресурса, функционирующая в режиме реального времени.

Модель в этом определении – это изображение существенных сторон физического объекта, в удобной форме отражающее информацию о нем. Модель всегда содержит рациональные упрощения, обусловленные конкретным содержанием решаемой задачи. Для одного объекта может быть создано несколько моделей, отражающих различные харак-

теристики или отдельные компоненты физического объекта [7]. Мехатронная система представляет конструктивное и функциональное объединение электромеханических, механических, электронных, электропитающих, информационных и управляющих компонентов. Создание и использование единой универсальной модели такой системы для решения практических задач не рационально. Поэтому цифровой двойник в общем случае содержит несколько моделей, обеспечивающих выполнение следующих основных функций [8, 9]:

- идентификация физического объекта, его компонентов и воздействий окружающей среды для создания адекватных моделей;
- функционирование в системе управления объектом, например, в качестве наблюдателей;
- автономная работа моделей, имитирующая различные варианты поведения физического объекта с целью сравнения, оптимизации, выявления проблемных ситуаций и др., для дальнейшей эффективной эксплуатации физического объекта;
- удаленный мониторинг состояния объекта и интеллектуальная диагностика;
- прогнозирование процессов, оценивание ресурса компонентов и рисков при эксплуатации;
- получение новых знаний об объекте, например, о характеристиках нагрузок, показателях надежности компонентов и др.;
- расширение информационного ресурса на основе сбора, обработки и хранения данных о работе объекта;
- информационное взаимодействие с ресурсами других систем.

Модели, входящие в состав цифрового двойника, по способу создания делятся на две группы [8, 10]. Первую группу составляют аналитические модели, основанные на физических законах. Такие модели имеют хорошую инженерную интерпретацию. Вторую группу составляют модели, использующие феноменологические описания, статистические методы построения зависимостей, методы машинного обучения и др. Проверка адекватности моделей – важная задача при создании и работе цифрового двойника.

Информационный ресурс цифрового двойника – это реализованная в виде программ искусственная организация (статическая или динамическая), осуществляющая сбор, обработку и хранение данных, реализацию заданных процедур идентификации, оптимизации, формирования управляющих воздействий и др., направленных на сохранение и оценивание изменений соответствия физического объекта и его модели. Информационный ресурс цифрового двойника включает характеристики датчиков, связей между компонентами, настроечные параметры систем управления, данные о модификации компонентов при обслуживании и др.

Непрерывная передача данных для цифрового двойника осуществляется инфраструктурой, обеспечивающей взаимодействие в реальном времени между компьютерным представлением и физическим объектом. Эта инфраструктура включает датчики, встроенные системы и подключение к Интернету.

Основным компонентом взаимодействия персонала и цифрового двойника является дружелюбный и удобный в навигации пользовательский интерфейс [11].

Диагностика компонентов мехатронных систем

Объект, взаимодействующий с цифровым двойником, постоянно находится в режиме эксперимента. В результате обеспечивается возможность непрерывного получения данных об объекте, преобразования, накопления, хранения, обработки и автоматического анализа данных в реальном времени. Цифровой двойник предоставляет инструментарий обнаружения и диагностики неисправностей [8–13].

Основные неисправности мехатронных систем проанализированы в [2, 12, 14]. Возможные отказы можно разделить на группы, соответствующие физической природе элементов. Это неисправности механических устройств, электрических элементов, электронных средств, электропитающих устройств, измерительных приборов и управляющих систем, включая программы. При этом в мехатронной системе, состоящей из взаимосвязанных компонентов, изменение характеристик одного из элементов приводит к нарушению работы других устройств. В эргатических мехатронных системах отказы могут быть связаны с действиями оператора, т.е. с проявлением человеческого фактора [11].

Диагностика каждого компонента представляет самостоятельную задачу. При этом выполняются следующие функции: непрерывный контроль информативных параметров и внешних воздействий, оценивание ресурса (исчерпанного и остаточного) обнаружение отклонений, анализ причин, принятие решения и сигнализация.

Неисправности электрических машин зависят от типа электрической машины и могут быть разделены на две категории: электрические и механические. Для разных типов электрических машин ис-

пользуются диагностические модели, отражающие характеристики, определяющие надежность и ресурс [15].

В работах [16–18] рассмотрены системы контроля двигателей постоянного тока. Измеряемые параметры: температура обмоток статора, температура подшипников, вибрация, сопротивление изоляции и состояние коллекторно-щеточного узла. Данные о температуре используются для тепловой защиты двигателей и оценивания ресурса изоляции в соответствии с ГОСТом 14209-97. Непрерывный контроль сопротивления изоляции двигателя, получающего питание от системы с изолированной нейтралью, производится с помощью специальных устройств [19]. Контроль работы щеточно-коллекторного узла производится путем измерения температуры обмоток, параметра, характеризующего искрение, тока, угловой скорости двигателя и длины щеток на основании модели его работы. На основании данных непрерывных измерений вычисляются коэффициент корреляции между параметром ξ , характеризующим искрение, и током i двигателя $r_{\xi i}$ и коэффициент корреляции между параметром ξ , характеризующим искрение, и угловой скоростью Ω двигателя $r_{\xi \Omega}$ на скользящем интервале времени.

Для асинхронных двигателей основная доля отказов связана с повреждениями обмоток и подшипниковых узлов. Для обнаружения неисправности используются измерения тока трехфазного двигателя, а затем используется машина опорных векторов [20].

В работе [21] рассмотрена методика диагностики синхронных машин с постоянными магнитами.

Наиболее частыми механическими причинами отказов электрических машин и механических передач являются отказы, связанные с подшипниками [5]. Для увеличения ресурса и надежности оборудования и сокращения затрат, связанных с ремонтами и простоями, необходима очень точная и надежная система диагностики текущего технического состояния подшипников. Одним из таких способов контроля и диагностики подшипников, широко распространенным во всем мире, является метод, базирующийся на измерении параметров вибрации [22]. Это обусловлено тем, что вибрация несет в себе информацию о состоянии подшипников и механизма в целом. Теория и практика анализов вибрационных сигналов в настоящее время обеспечивает получение достоверной информации о текущем состоянии не только подшипников, но и его основных элементов.

Изоляция является важной частью всех систем передачи и преобразования электрической энергии. При этом изоляция имеет ограниченный ресурс, зависящий от нагрузок и внешних воздействий. Основная цель применения цифровых двойников для изоляции обмоток электрических машин и кабелей – постоянный контроль сопротивления и оценивание

остаточного ресурса [23]. Непрерывный контроль и обработка данных с помощью нейронных сетей позволяют выявить на ранней стадии деградацию изоляции и определить причины, вызвавшие снижение сопротивления. В работе [24] предложен алгоритм идентификации повреждающих факторов для изоляции электрических машин: влаги, масла и температуры с помощью нейронной сети на основе анализа активного сопротивления, ёмкости и эквивалентного коэффициента диссипации.

Силовые полупроводниковые преобразователи в мехатронных системах характеризуются высоким уровнем отказов. По данным исследований, приведенным в [14], основными неисправностями силовых преобразователей являются силовые конденсаторы (30%), печатные платы (26%), силовые полупроводниковые приборы (21%), дефекты пайки (13%) и т. д.

Заключение

Полный контроль состояния оборудования в настоящее время является неотъемлемой функцией мехатронных систем различного назначения. Новая технология автоматизации на основе цифровых двойников обеспечивает высокий уровень управления в мехатронных системах машин путем расширения информационного ресурса на всех этапах жизненного цикла. Внедрение цифровых двойников в диагностику и прогнозирование мехатронных систем позволяет снизить затраты на техническое обслуживание, повысить эффективность использования отдельных устройств и систем, а также снизить затраты материальных и людских ресурсов.

Результаты работы двойников представляют собой экспериментальные данные для научных исследований объекта в режиме on-line.

Направление дальнейших исследований - разработка эффективных алгоритмов работы цифровых двойников для взаимосвязанных компонентов мехатронных систем.

1. Karve, P.M., Guo, Y., Kapusuzoglu, et al. Digital twin approach for damage-tolerant mission planning under uncertainty. *Engineering Fracture Mechanics*. 2020. 225. P. 1–28.
2. Rassõlkin A., Orosz T., Demidova G.L., et al. Implementation of Digital Twins for electrical energy conversion systems in selected case studies, *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*, 2021, 70, 1. P. 19–39, <https://doi.org/10.3176/proc.2021.1.03>
3. Малафеев С.И., Малафеев С.С. Информационные и управляющие компоненты электрических карьерных экскаваторов // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2021, № 4. С. 33–45. doi: 10.25018/0236_1493_2021_4_0_33.
4. Малафеева А.А., Малафеев С.С. Управление жизненным циклом компонентов мехатронных систем: применение цифровых двойников // Материалы Международной «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» (XXI Бенардосовские чтения). 3 – 4 июня 2021 г., III том. Электротехника. – Иваново, ИГЭУ им. В.И. Ленина, 2021. С. 83 – 86.
5. Algin V.B., et al. Development of digital twins for gears and transmissions based on lifetime mechanics and composites mechanics // *Actual Problems of Machine Science*. 2019, no 8. P. 172 – 184.
6. Lektavers A., Pecerska J., Bolsakovs V., et al. A Multi-Model Approach for Simulation-Based Digital Twin in Resilient Services, *Wseas Transactions on Systems and Control*, 2021, vol. 16, pp. 133 – 145. DOI: 10.37394/23203.2021.16.10.
7. Малафеев С.И., Малафеева А.А. Моделирование и расчет автоматических систем. – Владимир, Посад, 2003. – 200 с.
8. Tao F, Zhand M. *Digital Twin Driven Smart Manufacturing*. San Diego: 2019. 269 p.
9. Малафеев С.И., Тихонов Ю.В., Сагиров С.Н. Автоматизация исследований объектов в промышленности с использованием средств удаленного мониторинга // *Автоматизация в промышленности*, 2015, № 10. - С. 34 – 37.
10. Ritto T.G., and Rochinha F.A. Digital twin, physics-based model, and machine learning applied to damage detection in structures, June 16, 2020, pp. 1 – 27. <http://arxiv.org/abs/2005.14360v3>.
11. Малафеев С.И., Малафеева А.А. Эргатическая мехатронная система карьерного экскаватора: новые технические решения и человеческий фактор // *Автоматизация в промышленности*, 2020, №1. С. 27 – 31.
12. Vas P. *Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machines*. Oxford University Press, 1993. 384 p.
13. Adamenko D., Kunnen S., Pluhna R., et al. Review and comparison of the methods of designing the Digital Twin, 30th CIRP Design 2020, *Procedia CIRP* 91 (2020), pp. 27 – 32.
14. Yang S., Xiang D., Bryant A., et al. Condition monitoring for device reliability in power electronic converters: a review. *IEEE Trans. Power Electron.* 2010, 25(11). P. 2734–2752.
15. Воробьев В.Е., Кучер В.Я. Прогнозирование срока службы электрических машин: Письменные лекции. – СПб., Северо-западный государственный технический университет, 2004. – 56 с.
16. Малафеев С.И., Тихонов Ю.В. Автоматизация диагностики электрооборудования горных машин на основе моделирования рабочих процессов // *Автоматизация в промышленности*, 2014, №7. С. 9 – 13.
17. Патент РФ № 2536669, МПК G06G 7/63. Способ контроля и визуализации работы щеточно-коллекторного узла электрического двигателя постоянного тока / С.И. Малафеев, Ю.В. Тихонов, Н.А. Серебrenников. - Оpubл. 27.12.2014, Бюл. № 36.
18. Patent No. US 7873581 B2. Method and system for determining references cited the reliability of a dc motor system // G.L. Flickinger, G.J. Chmiel, H.A. Sutherland. Date of Patent: Jan. 18, 2011.
19. Малафеев С.И., Малафеев С.С., Серебrenников Н.А. Применение прогнозирующей модели для непрерывного контроля сопротивления изоляции и защиты электрической сети // *Контроль, диагностика*, 2012, № 10. С. 57 – 60.
20. Kandukuri S.T., Senanyaka J.S.L., Hyunh V.K., et al. A two-stage fault detection and classification scheme for electrical pitch drives in offshore wind farms using support vector machine. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 2019, 55(5). P. 5109 – 5118.
21. Bhuiyan E.A., A.A. Maenul, Das S.K., et al. A Survey on Fault Diagnosis and Fault Tolerant Methodologies for Permanent Magnet Synchronous Machines, *International Journal of Automation and Computing*, August 2020. P. 1–26. doi: 10.1007/s11633-020-1250-3.
22. Костоюков В.Н., Наumenko А.П. Практические основы виброакустической диагностики машинного оборудования. Омск: ОмГТУ, 2002. - 108 с.
23. Бабокин Г.И., Шпрехер Д.М., Колесников Е.Б. Метод повышения безопасной эксплуатации горного электрооборудования путем прогнозирования сопротивления изоляции // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2020. № 2. С. 34–45. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-34-45.
24. Guedes A.S., Silva S.M. Insulation Protection and Online Stress Agent Identification for Electric Machines using Artificial Intelligence // *IET Electric Power Applications*. Vol. 13, Issue 4, 2019. P. 559 – 570.

ВЛИЯНИЕ ДИФфуЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ФРИКЦИОННОМ НАГРЕВЕ ТЕПЛОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ С ПОКРЫТИЕМ НА СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В ПОВЕРХНОСТНОЙ ЗОНЕ

П.И. Маленко, А.Ю. Леонов

Тулский государственный университет, Тула, Россия; malenko@tsu.tula.ru

Диффузионные процессы при фрикционном нагреве служат источником разрушения исходных структур и образования вторичных структур. Разрушение исходных структур происходит на основе восходящей диффузии с частотным резонансным воздействием. Образование оксидных вторичных структур осуществляется по механизму реакционной диффузии. Показано, что механизм образования сульфидных, фосфидных и силицидных фаз вторичных структур в диффузионной зоне является атомным с участием фазового резонанса, так как соответствующие атомы образуют процесс случайных блужданий.

Введение

Разработка и внедрение эффективных технологий поверхностного упрочнения сталей, обеспечивающих гарантированную работоспособность изнашивающихся узлов технологических машин и снижение их материалоемкости является одной из основных задач современного машиностроения. Особую значимость данная проблема приобретает для технологических машин специального назначения – стрелково-пушечного вооружения (СПВ), эксплуатирующихся в условиях высокой скорострельности, приводящей к фрикционному нагреву вследствие импульсных динамических и температурных воздействий. Было установлено, что в процессе эксплуатации в поверхностной зоне контактирующих деталей происходят структурно-фазовые превращения: исходные структуры (ИС) разрушаются и образуются вторичные структуры (ВС). Донорами образования ВС служат окружающая среда (кислород и сера) и химические элементы диффузионной зоны (молибден, фосфор, кремний, сера). Именно ВС обеспечивают основную долю ресурса узлов СПВ. Было установлено, что данные процессы являются термоактивируемыми. На контактирующих шероховатых поверхностях возникают высокочастотные температурные процессы (термоциклирование) [1]. В работах Ю.Н. Дроздова и П.И. Маленко было установлено, что в результате термоциклирования на контактирующих поверхностях возникают термические удары (ТУ) с давлением $P \leq 15$ ГПа, которые распространяются по глубине поверхностной зоны, перпендикулярно поверхности трения [2,3]. Вместе с тем, очевидно, что диффузионные процессы, разрушающие ИС, направлены в сторону (восходящая диффузия по В.С. Горскому), противоположную действию фиковской энтропийной диффузии [4]. Таким образом, причины, вызывающие разрушение ИС и появление ВС, оставались неисследованными.

В настоящее время при изучении диффузионных процессов применяют методы молекулярной динамики (ММД), позволяющие моделировать исследуемые процессы.

В работе [5] приведены результаты моделирования ММД процесса перемещения атомов под действием ТУ в поверхностной зоне теплостойкой стали 25Х3МЗНБЦА с никотрированным покрытием. Анализ траекторий перемещений атомов позволил определить механизм диффузии как простой кооперативный (эстафетный) с коэффициентами диффузии $D=10^{-6} \div 10^{-8}$ м²/с. Однако объяснить более высокие экспериментальные коэффициенты диффузии порядка $D=10^{-5}$ м²/с на основании данного механизма не представляется возможным. Предварительные расчеты показали, что под действием ТУ может возникать другой механизм, определенный как кооперативный механизм с нелинейным резонансным воздействием.

Постановка задачи

Теоретические основы кооперативного механизма диффузии с нелинейным резонансным воздействием изложены в работе [3]. Основанием для исследования подобного механизма диффузии послужил сравнительный анализ экспериментальных коэффициентов диффузии [6] с коэффициентами диффузии $D_{\text{кооп}}$ при простом кооперативном механизме. Более чем в 70 % случаев $D_{\text{эксп}}=10^{-4} \div 10^{-5}$ м²/с превосходит $D_{\text{кооп}}$.

Резонансные процессы при трении – быстродействующие ($\tau \approx 10^{-12}$ с), поэтому предпочтительнее моделирование, при котором резонанс определяется как резкое повышение амплитуд вынужденных колебаний N атомов, расположенных в наборе кристаллических решеток виртуального кристаллита. Атомы совершают тепловые колебания частотой ω_0 и испытывают внешние периодические воздействия – ТУ частотой ω . Согласно теореме Борна-Линдемана распределение частот колебаний реального металла, представляющего собой большую кристаллическую решетку из N атомов, близко к распределению частот виртуальной решетки с циклическими граничными условиями [7]. В свою очередь,

виртуальная система из N атомов эквивалентна цепочке простых гармонических осцилляторов с соответствующими частотами ω_0^i . Если данную цепочку связать потенциалом парных взаимодействий (ППВ), то согласно теории колебаний движение атомов в цепочке определяется как движение осцилляторов в поле, заданном ППВ [8]. При отсутствии внешнего воздействия данная система математически описывается как автономная.

При наличии ТУ система превращается в неавтономную с кубической нелинейностью диссипаций и дисперсий. Математическое описание такой системы имеет вид [8]

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x = -2\gamma \dot{x} + \beta x^3 + f \cos(\omega + \varphi), \quad (1)$$

где левая часть уравнения – тепловые колебания атомов частотой ω_0 , правая – параметры, отражающие воздействие ТУ.

Исследовались диффузионные процессы в парах трения скольжения со смазочным материалом при рабочих нагрузках: давление $\sigma = 1 \dots 10$ МПа, скорость трения $V_{тр} = 0,5 \dots 10$ м/с, марка теплостойкой стали – 25Х3МЗНБЦА, смазочный материал – индустриальное масло И-20, упрочняющее покрытие – карбонитридный (никотрированный) слой толщиной $h = (10 \dots 15) \cdot 10^{-6}$ м.

Результаты и их обсуждение

В работе [6] показано, что в процессе испытаний на машине трения, имитирующей работу пары трения, происходят изменения структурно-фазового состава поверхностной зоны: ИС трансформируются во ВС, которые в целом определяют ресурсную долговечность пары трения (рис. 1).

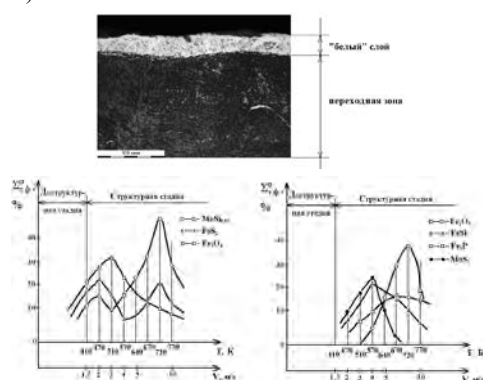


Рис. 1. Трансформация исходной структуры поверхностной зоны стали 25Х3МЗНБЦА после никотрирования во вторичные фазы в различных температурных зонах

Ингредиентами для образования ВС служат окружающая среда (кислород из воздуха, сера – из смазочного материала) и элементы трансформации фазового состава ИС (P, S, Si, Mo). Распад ИС вызван действием восходящей диффузии в результате возникновения ТУ [2,3] и его трансформации в поверхностной зоне [2,3]. В

результате возникают напряжения $\sigma_{диф}$, связанные с появлением диффузионных процессов и направленные вверх, перпендикулярно поверхности трения и напряжения дислокационного упрочнения $\sigma_{дисл}$, направленные параллельно поверхности трения.

Установлен механизм восходящей диффузии – кооперативный с нелинейным резонансным воздействием [3], определены коэффициенты диффузии для атомов исходных фаз поверхностной зоны (табл. 1).

Таблица 1. Коэффициенты диффузии для атомов ИС поверхностной зоны

Фаза	$D \cdot 10^7, \text{м}^2/\text{с}^2$
$\alpha\text{-Fe}$	-
Fe_2P	2,64
FeSi	3,96
FeS_2	3,96
$\alpha\text{-Mo}$	-
MoS_2	2,2
$\text{MoSi}_{0,65}$	8,8

Диффузионные процессы при образовании фаз ВС значительно различаются: образование оксидных фаз происходит под действием реакционной диффузии, образование же фаз Fe_2P , FeSi , MoS_2 и отчасти FeS_2 происходит по атомному механизму [9]. Для исследования данных диффузионных процессов использовались элементы термодинамики необратимых процессов [10] и самоорганизации открытых систем [11]. Образование оксидных фаз происходит на основе параболического закона К. Вагнера [12]. С помощью редуцированного брюсселятора Тьюринга-Пригожина [11] был определен термодинамический параметр g в формуле Вагнера

$$D = D_k \cdot g. \quad (2)$$

В результате были определены значения коэффициентов диффузии для оксидных фаз (табл. 2).

Таблица 2. Значения коэффициентов диффузии для оксидных фаз

Элементы, фаза	$D, \text{м}^2/\text{с}$
O	$7,3 \cdot 10^{-6}$
$\alpha\text{-Fe}$	$3 \cdot 10^{-8}$
$\gamma\text{-Fe}$	$9 \cdot 10^{-8}$
$\varepsilon\text{-Fe}$	$1,6 \cdot 10^{-8}$
$(\alpha\text{-Fe})\text{O}$	-
$(\gamma\text{-Fe})_3\text{O}_4$	-
$(\varepsilon\text{-Fe})_2\text{O}_3$	-

Механизм диффузии серы из смазочного материала определяется, во-первых, действием кинетического процесса, определяемого с помощью редуцированного брюсселятора для оксидных фаз, и, во-вторых, действием встречных диффузионных процессов. В результате совместного действия данных процессов образуется давление сжатия $-P$ и давление расширения $+P$ (табл. 3).

Ингредиенты распада ИС (атомы S, P, Si и матрицы Fe и Mo) находятся в хаотическом состоянии. П. Шьюмон [9], используя результаты исследований В. Феллера, связанные с теорией случайных блужданий, предложил атомный механизм диффузии для ингредиентов, находящихся в состоянии случайных блужданий. Я.Е. Гегузин [4], обобщив результаты, полученные П. Шьюмоном и другими авторами, предложил зависимость, определяющие коэффициенты диффузии:

$$D = \frac{a}{30\tau}, \quad (3)$$

где $a=a_0/2$ (a_0 – параметр кристаллической решетки; τ – время перескока атомов);

$$D = 7,38 \cdot 10^{-2} \frac{d^2}{\tau}, \quad (4)$$

где d – диаметр экспериментального образца; τ – время наблюдений.

Таблица 3. Величины давлений во встречных диффузионных потоках S и α -Fe

T, °C P, ГПа	200	400	600
-P	1,0	2,2	3,5
+P	3,0	5,3	8,1

Под действием давления поля излучения ингредиенты начинают перемещаться, сталкиваются между собой, то есть образуют случайные блуждания. Матрицей для образования фаз BC Fe₂P, FeSi и FeS₂ служит α-Fe. Матрицей для образования фаз MoSi_{0,65} и MoS₂ служит Mo.

Исследования С.П. Кузнецова [8] показали, что сила внешнего воздействия при трении $P = \cos(\omega - \varphi)$ помимо частотного резонанса вызывает и фазовый φ резонанс (рис. 2).

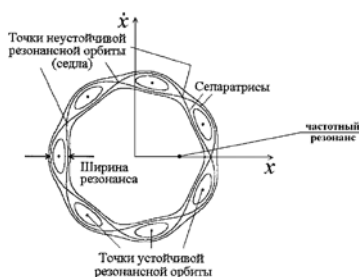


Рис. 2. Фазовый портрет изолированного нелинейного резонанса в стробоскопическом сечении Пуанкаре с подписями, поясняющими основные элементы картины

Фазовый резонанс в виде “ожерелья” располагается вокруг частотного резонанса, имеет неустойчивые седловые точки. Внутри фазового резонанса располагаются электроны, находящиеся в хаотическом состоянии, но “ожерелье” резонанса – устойчиво.

Распад “ожерелья” происходит только под действием теплового излучения [11], так как теплопроводность и конвективный теплообмен вследствие наличия реакционных явлений не могут осуществлять данный процесс. Образующиеся при распаде тепловые волны приводят хаотически

расположенные атомы в состояние процесса случайных блужданий. В результате реализуется атомный механизм диффузии [9].

Коэффициенты диффузии для атомного механизма приведены в таблице 4.

Таблица 4. Значения коэффициентов диффузии D для фаз ВС (атомный механизм диффузии)

Фаза	$D \cdot 10^8, \text{м}^2/\text{с}$	Фаза	$D \cdot 10^8, \text{м}^2/\text{с}$
Fe_2P	2,64	MoSi_2	2,2
FeSi	3,96	$\text{MoSi}_{0,65}$	8,8
FeS_7	3,96		

Таким образом, при наличии процесса термоциклирования, сопровождаемого ТУ, трансформирующимися далее в поверхностной зоне, возникает восходящая диффузия с напряжениями $\sigma_{\text{диф}}$. Исследованный с помощью ММД механизм восходящей диффузии позволил установить, что, во-первых, он относится к кооперативному типу с частотным резонансным воздействием, во-вторых, определены коэффициенты диффузии сульфидных, фосфидных и силицидных фаз на основе Fe и Mo.

1. Маленко П.И. Исследование температур на дискретных субшероховатых поверхностях при трении скольжения со смазочным материалом // Вестник машиностроения. 2011. № 7. С. 38—42.
2. Дроздов Ю.Н., Маленко П.И. Структурно-фазовые превращения в поверхностных слоях сталей при трении скольжения // Трение и износ. 2014. Т.35. № 1. С.87—98.
3. Дроздов Ю.Н., Маленко П.И. Исследование резонансных процессов в поверхностных слоях пар трения скольжения со смазочным материалом, вызванных термическими ударами // Вестник машиностроения. 2015. № 2. С. 44—52.
4. Гегузин Я.Е. Восходящая диффузия и диффузионное последствие // Успехи физических наук. 1986. Т. 149. Вып. 1. С. 149—159.
5. Маленко П.И. Исследование методом молекулярной динамики диффузионных процессов в поверхностных слоях нитрированных теплостойких сталей в процессе трения скольжения с ресурсным смазыванием // Вестник ЮУрГУ. Серия: Машиностроение. 2014. Т. 14. № 3. С. 22—29.
6. Маленко П.И., Зеленко В.К., Левин Д.М. Температурные поля и эксплуатационные свойства пар трения скольжения со смазочным материалом / Под ред. Ю.Н. Дроздова. М.: Машиностроение. 2011. 239 с.
7. Борн М., Хуан Кунь. Динамическая теория кристаллических решеток. М.: Изд-во иностр. лит., 1958. 488 с.
8. Кузнецов А.П., Кузнецов С.П., Рыскин Н.М. Нелинейные колебания. М.: Физматлит, 2002. 292 с.
9. Шьюмон П. Диффузия в твердых телах. М.: Металлургия, 1966. 195 с.
10. Журавлев, В.А. Термодинамика необратимых процессов в задачах и решениях. М.: Наука, 1979. 130 с.
11. Трубецков Д.И., Мчедлова Е.С., Красиков Л.В. Введение в теорию самоорганизации открытых систем. М.: Физматлит, 2005. 211 с.
12. Еремеев В.С. Диффузия и напряжения. М.: Энергоатомиздат, 1984. 182 с.

ДИАГНОСТИКА ТЕРМОНАПРЯЖЁННОГО СОСТОЯНИЯ ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОБОРУДОВАНИЯ АЭС И ТЭС С ПРИМЕНЕНИЕМ НАТУРНОЙ ТЕНЗОТЕРМОМЕТРИИ

С.В. Маслов

Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; maslovsv@inbox.ru

Цель работы, постановка задачи

Как показывает анализ условий нагружения оборудования АЭС и ТЭС [1,2], повышенная повреждаемость металла внутренних поверхностей может вызываться воздействиями теплоносителя с переменной температурой. На рис. 1 показан вид поверхности металла, подвергнутого термоциклическому воздействию агрессивного теплоносителя. Видны неровности и микротрещины, являющиеся возможными инициаторами разрушения металла.

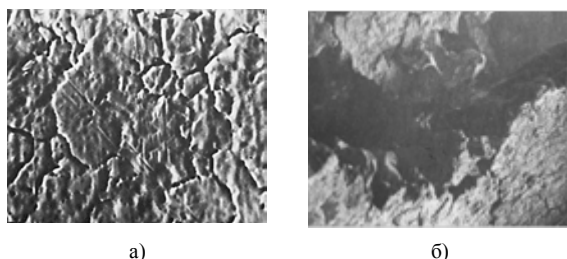


Рис. 1. Поверхность металла (сталь X18H10T), подвергнутого термоциклическому воздействию теплоносителя с переменной температурой: а) в начале испытаний (1:2000); б) после возникновения макротрещины (1:400)

Непосредственный контроль напряженного состояния внутренних поверхностей оборудования обычно невозможен, поэтому для определения напряженно-деформированного состояния (НДС) целесообразно использовать системы косвенного мониторинга, в которых используются непосредственно измеряемые при эксплуатации параметры - температуры и (при наличии соответствующих средств измерений) напряжения в контролируемых точках. Цель настоящей работы - разработка алгоритмов проведения измерений и организации вычислительных процедур, позволяющих по измеренным функциям изменения напряжений и температур в доступных зонах конструкции определять НДС в опасных точках её внутренней (недоступной) поверхности.

Формирование модели представления процесса изменения термонапряженного состояния конструкции.

Для восстановления НДС в опасных зонах конструкции по результатам измерений напряжений и температур в контрольных точках необходимо построить математическую модель процессов, не противоречащую экспериментально полученным функциям изменения измеряемых величин [3]. В общем случае задача построения таких алгоритмов сложна и предполагает использование специальных методов

регуляризации решений, в особенности для конструкций сложной геометрии [4,5]. Решение задачи для элементов цилиндрической формы, к которым относятся трубопроводы АЭС и ТЭС, допускает применение более простого алгоритма, основанного на следующей модели представления изучаемого процесса. Конструктивный цилиндрический элемент считается неограниченным с отсутствующими градиентами температуры вдоль продольной оси; наружная поверхность считается теплоизолированной, что во многих случаях соответствует реальным условиям [2,6]. В качестве исходных данных используются показания тензорезисторов, расположенных на наружной поверхности, и термопар, установленных в глубине (рис.2).

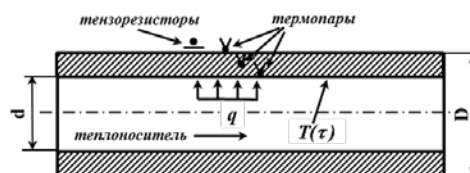


Рис. 2. Модель элемента цилиндрической конструкции с установленными первичными преобразователями

Как известно [7], процессы изменения температуры теплоносителя в трубопроводах сложны и не всегда могут быть адекватно смоделированы. Кроме того, возникают неопределённости в задании температуры теплоносителя и моделировании условий теплопередачи тепла к стенкам. Предлагаемый алгоритм позволяет не рассматривать эти условия, моделируя непосредственно температуру внутренней поверхности трубопровода. Предполагается независимость теплофизических свойств конструкционных материалов от температуры.

Измеряемые на наружной поверхности напряжения в рассматриваемый интервал времени $[0, \tau_N]$ представляются в виде:

$$\sigma_n^{(j)} = \sum_{i=0}^k \varphi_{1+i}^{(j)} \Delta T_{n-i} \quad (1)$$

где $\sigma_n^{(j)}$ - напряжения на наружной поверхности цилиндра в конце промежутка разбиения интервала времени с номером «n», $\varphi_{n-i}^{(j)}$ - матрица оператора преобразования, ΔT_{n-i} - неизвестное линейное повышение температуры на участке разбиения интер-

вала времени с номером $(n-i)$. Элементы матричного оператора $\varphi_{1+i}^{(j)}$ являются величинами напряжений в конце промежутка времени τ_{1+i} , вызванных единичным линейным повышением температуры внутренней поверхности в промежутке времени $(n-i-1, n-i)$. Из физического смысла матричного оператора следует его инвариантность по отношению к моменту начала отсчёта времени τ_n , каждый элемент матрицы определяется только разностью номеров i . Индекс (j) в формуле (1) характеризует число отрезков разбиения рассматриваемого интервала времени на участки длительностью $\Delta\tau$. Вычисление элементов матрицы $\varphi_i^{(j)}$ выполняется расчётным путем (например, численным расчётом в среде ANSYS), исходными данными являются известные физические, механические характеристики материалов и геометрические параметры конструкции.

В формуле (1) предполагается, что влияние линейного повышения температуры на измеряемые напряжения распространяется только на заданное число шагов разбиения, обозначенное индексом « k ». Рассматриваемый подход к решению задачи основан на принципе суммирования температурных полей, вызванных отдельными тепловыми воздействиями со стороны внутренней поверхности. Как показал опыт проведения исследований НДС оборудования АЭС и ТЭС [7], указанные предположения могут приниматься для обширного класса конструкций.

Принцип моделирования функции изменения температуры внутренней поверхности и разбиения рассматриваемого интервала времени $[0, \tau_N]$ на отрезки $\Delta\tau$ приведен на рис.3. При использовании указанного метода дискретизации функции $\sigma_n^{(j)}$ возникает проблема несоответствия экстремумов измеренной функции с границами отрезков времени τ_i . В случае, если это несоответствие не превышает периода времени между отдельными измерениями, значение $\sigma_n^{(j)}$ принимается равным ближайшему измеренному значению. В противном случае необходимо увеличивать кратность разбиения анализируемого интервала времени до достижения указанного условия. Крайний случай подобного подхода - использование разбиения интервала времени на отрезки, соответствующие частоте измерения показаний тензорезисторов измерительным прибором. Другим способом решить проблему является применение алгоритмов «сглаживания» измеренных функций методом сплайн-аппроксимации.

В результате решения системы (1) относительно величин ΔT_{n-i} формируются показанные на рис. 3а ступенчатые функции $T^j(\tau)$, где j – индекс, характеризующий число отрезков разбиения интервала времени от 0 до τ_N . При решении задачи фор-

мируется ряд решений для нескольких j , число участков разбиения определяется адекватностью учёта измеренных значений $\sigma_n^{(j)}$. Для выбора $T(\tau)$ используется результаты измерений температуры глубинными датчиками (рис.1).

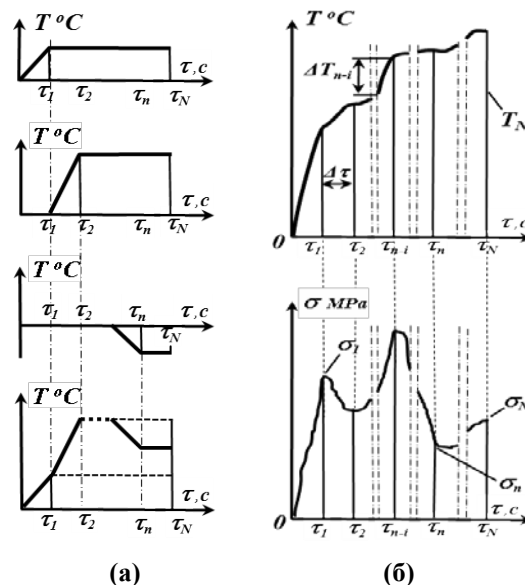


Рис. 3. Моделирование процесса термоупругого нагружения элемента конструкции:

а) построение функции изменения $T(\tau)$ как суммы воздействий на отдельных участках шкалы времени; б) – представление функций изменения температуры внутренней поверхности и напряжений снаружи

Выбор $T(\tau)$ определяется формулой:

$$\sqrt{\left[\sum_{n=1}^N (Y_n^* - Y_n)^2 \right]} = \min, \quad (2)$$

где Y_n^* и Y_n – соответственно измеренные и сформированные из решений задачи теплопроводности значения температур в точках установки глубинных датчиков. Выражение (2) является по существу реализацией метода наименьших квадратов.

Экспериментальная проверка разработанной методики при определении термонапряжённого состояния металлической модели

Для апробации разработанного алгоритма проведены лабораторные испытания физической модели, имитирующей типовой элемент, подвергающийся тепловым воздействиям теплоносителя. Конструктивно модель соответствует схеме, приведенной на рис.1; геометрические размеры составляют: $D = 56\text{ мм}$; $d = 37,5\text{ мм}$. Материал модели – сталь марки 12Х1МФ, физические и механические свойства: теплопроводность $\lambda = 44\text{ Вт/(м*К)}$; плотность $\rho = 7,78\text{ кг/см}^3$; температурный коэффициент расширения $\alpha = 12,5 \cdot 10^{-6}\text{ К}^{-1}$; $E = 1,93 \cdot 10^5\text{ МПа}$. Модель подвергалась интенсивному тепловому воздействию

горячего теплоносителя с температурой 95°C со стороны внутренней поверхности; для измерения сигналов первичных преобразователей использовался измерительный комплекс фирмы L-CARD, обеспечивающий синхронную запись показаний тензорезисторов и термопар. Зафиксированные при испытаниях функции изменения температур и сигналов тензорезисторов приведены на рис. 4. Применение разработанной методики позволило на основе измеренных напряжений на наружной теплоизолированной поверхности восстановить температурное поле всей модели. Из решения задачи теории упругости восстановлены напряжения на внутренней поверхности расчётом в среде ANSYS.

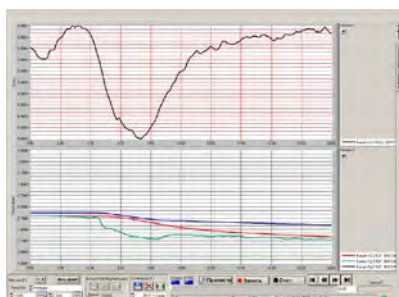


Рис. 4. Напряжения (вверху) и температуры (внизу) на внутренней поверхности (верхняя кривая), в середине стенки (средняя кривая) и на наружной поверхности

На рис. 5 сопоставлены результаты измерений и полученные результаты применения разработанного алгоритма. Максимальное различие измеренных и расчётных температур составляет около $7,5^{\circ}\text{C}$. Погрешность определения напряжений на внутренней поверхности модели составило около 10%.

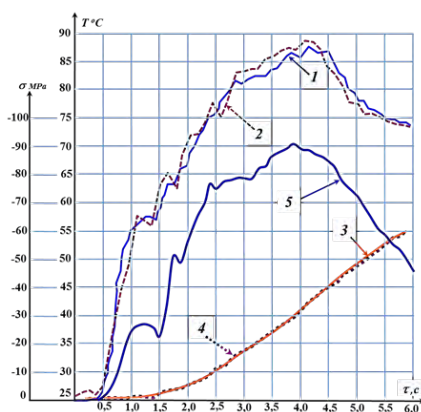


Рис. 5. Результаты решения задачи определения температур в стенке модели и результаты измерений: 1 - измеренная температура внутренней поверхности; 2 - восстановленная температура внутренней поверхности; 3 и 4 - измеренная и восстановленная температуры на $\frac{1}{2}$ толщины стенки; 5 - восстановленные напряжения на внутренней поверхности (МПа)

Выводы и результаты исследований

1. Разработан алгоритм оценки напряжений, возникающих на внутренних поверхностях цилиндрических элементов энергетического оборудования, подверженных тепловым воздействиям со стороны теплоносителя.

2. Показано, что в качестве исходных данных для обратной задачи восстановления температуры внутренней поверхности цилиндрической конструкции могут служить измеренные напряжения на её наружной теплоизолированной поверхности,

3. Проведенные модельные испытания показали, что полученные по разработанной методике результаты численного анализа близки к полученным экспериментально результатам. Различие расчётных и экспериментальных данных составляет 7-10% от определяемых величин, что соответствует погрешности эксперимента.

1. Албагачиев А.Ю., Алексеева С.И., Ахметханов Р.С., и др. Прочность, ресурс, живучесть и безопасность машин Ответственный редактор Мазутов Н.А., Москва, издательство "Книжный дом "ЛИБРОКОМ" 2019 – 576 с.
2. Шарый Н.В., Семишкин В.П., Пиминов В.А., Драгунов Ю.Г. Прочность основного оборудования и трубопроводов реакторных установок ВВЭР. М.: ИздАТ, 2004, -493с
3. Фомин А.В, Михалев Ю.К. Расчётно-экспериментальные методы в системах оперативной диагностики термонапряжённости элементов машин и конструкций // Проблемы машиностроения и надёжности машин. 2007, № 3, с. 97-104
4. Maslov S.V. A computational-experimental method for determination of the stress-strain state of thermally-loaded power equipment according to full-scale strain-gauging data / Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2019. T. 48. № 2. С. 141-148.
5. Razumovskii I.A., Chernyatin A.S., Fomin A.V. Experimental-Computational Methods for Determination of the Stress-Strain State of Structural Components//Inorganic Materials. 2014. V. 50. No 15. P. 1528-1536.
6. Дранченко Б.Н., Драгунов Ю.Г., Портнов Б.Б., Селезнев А.В. Экспериментальные исследования напряжённого состояния и прочности оборудования ВВЭР. - М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. – 640 с
7. Махутов Н.А., Дайчик М.Л., Маслов С.В. и др. Методы и результаты исследований напряжённого состояния реакторной установки ВВЭР-1000 при эксплуатации / Международный центр научной и технической информации, Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН. М., 1992 - .115с.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ХОЛОДОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ ПРИ КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Н.А. Махутов, И.В. Макаренко, Л.В. Макаренко

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. Москва, Россия; I.V.Makarenko@Yandex.ru

В работе предложены уточняющие параметры определяющих уравнений процесса упругопластического деформирования, на основе расчетно-экспериментальных результатов и численных расчетов характеристик нелинейной механики разрушения, при наличии разно-ориентированных поверхностных полуэллиптических трещин, как в элементах, так и в сварных соединениях аустенитных нержавеющей сталей с учетом температурного воздействия. На основе анализа исследования современных моделей расчетно-экспериментальных результатов и численных методов программных алгоритмов расчета прочности и живучести оборудования, проведено моделирование разнонаправленной кинетики упругопластического разрушения в сварных соединениях конструкционных сталей с учетом криогенных температур.

Цель

В работе исследованы закономерности, критерии и характеристики процессов деформирования и разрушения конструкционных, холодоустойчивых аустенитных нержавеющей сталей типа Ст18–Ni9 при наличии исходных трещиноподобных дефектов [1]. Целью исследований было формирование моделей и определяющих уравнений для описания этих (процессов в упругой (линейной) и упругопластической нелинейной) постановке для комнатной ($T=295\text{ K}$) и низкой (криогенной $T=77\text{ K}$) температур.

Материалы и результаты исследований

Эксперименты проводились на гладких лабораторных образцах и трубчатых цилиндрических образцах наружным диаметром $D=50\text{ мм}$ с толщиной стенки $t=(10-2)\text{ мм}$. На трубчатых образцах наносились острые наклонные под углом β к оси нагружения полуэллиптические поверхностные надрезы глубиной $b_0=(0.06-0.030)t$ протяженностью $2a_0=(0.003-0.045)\pi D$ по поверхности.

На гладких образцах определялись базовые физико-механические свойства (σ_T - предел текучести, σ_b - предел прочности, m - показатель упрочнения, e_k - истинная разрушающая деформация). На надрезанных образцах методом прецизионных делительных сеток с шагом $0,1\text{ мм}$ изучалось распределение локальных деформаций $e_{\max}$ в вершине трещины ℓ , направление и величина подрастания трещины $\Delta\ell$ при увеличении напряжений на величину $\Delta\sigma$, а также критические величины при разрушении e_k и σ_k .

На основе результатов экспериментов, аналитических и численных решений на базе уравнений линейной и нелинейной механики разрушения была показана экспоненциальная зависимость механических свойств σ_T, σ_b от температуры $\{\sigma_T, \sigma_b\} = F\{\exp T\}$. Зависимость напряжений σ от деформаций – описывается степенным выражением $\sigma = F(e^m)$.

Для объяснения упругопластического деформирования в вершине наклонных трещин пара-

метром, определяющим напряженно-деформированное состояние и рост трещин, можно принять коэффициент интенсивности деформаций.

$$K_{le} = F\{(K_I, K_{II}, K_{III}), P_{ke}, m, \beta, \sigma / \sigma_T\}. \quad (1)$$

где K_I, K_{II}, K_{III} - коэффициенты интенсивности напряжений по уравнениям линейной механики разрушения [2], P_{ke} - расчетный показатель ($1 \leq P_{ke} \leq 2$), σ / σ_T - относительный уровень напряжений. Рост трещины при увеличении σ и числа циклов N нагружения определяется степенным уравнением (2).

$$\{d\ell / d\sigma, d\ell / dN\} = F(K_{le}^{m_e}), \quad (2)$$

где m_e - расчетный коэффициент ($2 \leq m_e \leq 4$), зависящий от σ / σ_T [3].

Предельное состояние при разрушении в условиях комнатной и криогенной температуре T , достигается по деформационному критерию нелинейной механики разрушения [1, 3].

$$K_{le} = K_{lec} = F\{e_c, m, \sigma_c / \sigma_T\}. \quad (3)$$

Результаты проведенных экспериментов и численных расчетов при различных T , уровнях нагружения σ / σ_T , размерах ℓ и углах наклона β трещин подтверждают возможность использования в расчетах прочности и трещиностойкости конструкций из аустенитных хладостойких сталей.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 20-19-00769.

1. В.В. Панасюк, М.П. Саврук. Плоская задача теплопроводности и термоупругости для тел с трещинами// Успехи механики.-1984.-Т.№2. -С.75-115.
2. Махутов Н.А.. Конструкционная прочность, ресурс и технологическая безопасность. В двух частях. - Новосибирск, «Наука», 2005, - 1110с.
3. N.A Makhutov, I.V. Makarenko, L.V. Makarenko. Analysis and simulation of kinetics of elasto-plastic weld failure in structures at cryogenic temperatures. 2019 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. V. 681. WR2019.

УСЛОВИЯ МИКРО РАЗРУШЕНИЯ НА ОСНОВЕ ДВУХПАРАМЕТРИЧЕСКОГО КРИТЕРИЯ ПРИ СЛОЖНОМ НАГРУЖЕНИИ

Н.А. Махутов, И.В. Макаренко, Л.В. Макаренко

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. Москва, Россия; I.V.Makarenko@Yandex.ru

Известно, что условия разрушения формируются в процессе упругопластического микро деформирования по контуру трещин с учетом их кинетики. На основе деформационного критерия разрушения, расчетно-экспериментальных, численных и аналитических методов с применением математической модели пространственного распределения механических свойств, получены определяющие соотношения условий перехода к закритической стадии микро разрушения при сложном напряженном состоянии. Предложен двухпараметрический критерий микро разрушения в анизотропной среде с учетом температуры и толщины элементов конструкций.

Цель

Сформулированы основные положения, даны определяющие уравнения микро-разрушения и общая методология проведения уточняющего расчета прочности и надежности деталей конструкций и сварных элементов ответственного оборудования авиационной, космической, ядерной и тепловой техники из неоднородных металлических материалов при линейных и нелинейных условиях нагружения на основе деформационного критерия разрушения. На основе расчетно-экспериментального, численного и аналитического методов и математической модели пространственного распределения механических свойств получены расчетные кинетические зависимости для развивающихся наклонных поверхностных малоцикловых полуэллиптических трещин в зонах сварного соединения. Данные конечно-элементного моделирования реализованы на основе макросов программного комплекса ANSYS.

Материалы и результаты исследований

Исследования проводились на аустенитных нержавеющей сталях типа 08X18H10T, X18H9 и их сварных соединениях. Для экспериментального определения характеристик трещиностойкости и кинетики исходных наклонных поверхностных полуэллиптических малоцикловых трещин использовались как сварные, так и не сварные, плоские и цилиндрические трубчатые образцы.

При пространственном упругопластическом нагружении тел с трещинами на основании деформационного критерия разрушения [1, 2] и критерия δ_k -модели [3-5] можно записать критериальное уравнение

$$K_{le}^{V_1} K_{lec}^{-V_1} + K_{lle}^{V_2} K_{llc}^{-V_2} + K_{lle}^{V_{31}} K_{llc}^{-V_3} = 1. \quad (1)$$

Здесь V_1 , V_2 и V_3 - экспериментально определяемые параметры материала, K_{le} и K_{iec} - соответственно коэффициент интенсивности деформаций и критический коэффициент интенсивности де-

формаций для данной модели разрушения при $i = I, II, III$ (нормального отрыва, поперечного и продольного сдвига).

Наряду с силовым и энергетическим критериями, для упруго-пластического тела с произвольно ориентированной трещиной ℓ_{ijk} под внешним воздействием, приоритетным применением является деформационный критерий разрушения.

$e_{\max} = e_f$. Здесь; $e_{\max}$ - максимальная локальная деформация на контуре трещины, e_f - локальная разрушающая деформация.

Получены новые результаты процесса разрушения упругопластической деформационной анизотропии, которые иллюстрируют хорошее согласование экспериментальных результатов и численных расчетов.

В результате, предложенный двухпараметрический критерий возникновения упругопластического микро-разрушения в анизотропной среде с учетом температуры и толщины элементов конструкций позволяет получить уточняющую оценку прогнозирования допускаемых размеров дефектов, прочности, ресурса, живучести и безопасности эксплуатации ответственного оборудования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 20-19-00769.

1. Махутов Н.А.. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность. В двух частях. - Новосибирск, «Наука», 2005, - 1110с.
2. N.A. Makhutov, I.V. Makarenko, L.V. Makarenko. Analysis and simulation of kinetics of elasto-plastic weld failure in structures at cryogenic temperatures. WR2019IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 681 (2019) 012030 IOP, pp. 1-6. doi:10.1088/1757-899X/681/1/012030
3. В. В. Панасюк. Механика квазихрупкого разрушения материалов. - Киев: Наукова думка, 1990. 415 с.
4. В. В. Панасюк. Предельное равновесие хрупких тел с трещинами. - Киев: Наук. Думка, 1974. - 416 с.
5. Е.М. Морозов. Расчет на прочность при наличии трещин.// прочность материалов и конструкций. - Киев: Наук. думка, 1975. - С. 323-333.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЗАПАСА ПРОЧНОСТИ КОНСТРУКЦИИ СТЕКЛОКОМПОЗИТНЫХ ТРУБ ДЛЯ МИКРОТОННЕЛИРОВАНИЯ

Д.А. Мельников¹, А.Ю. Албагачиев¹, В.А. Антошин², С.В. Иванов¹.

¹Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; fast-trust@yandex.ru.

²Общество с ограниченной ответственностью «Новые Трубные Технологии», Москва, Россия; antoshin@ntt.su.

В работе определены упруго-прочностные характеристики стеклокомпозитных труб на элементарных образцах из труб, образцах труб, и сборках из двух образцов труб, соединенных между собой стальной муфтой. На основании полученных данных определены коэффициенты запаса прочности стеклокомпозитных труб. Проведена оценка характера разрушения стеклокомпозитных труб при сжатии.

Введение

Одним из наиболее прогрессивных методов строительства новых инженерных сетей является метод бестраншейной прокладки – микротоннелирование. Микротоннелирование позволяет прокладывать трубопроводы и тоннели без демонтажа развитой инфраструктуры, обустройства объездных путей и дорогостоящего переноса охраняемых объектов [1].

На сегодняшний день в г. Москве ведущими мировыми организациями эксплуатирующими инженерные сети (АО «Мосводоканал», ГУП «Мосводосток») применяется уже более 30 км стеклопластиковых труб, проложенными методом микротоннелирования.

При проходке микрощитовые трубы поочередно вдавливают с помощью домкратной станции, при этом каждая труба работает на осевое сжатие, что предъявляет высокие требования к механическим характеристикам материала труб. В качестве материала для микрощитовых труб, в зависимости от особенностей объекта применяют: сталь, железобетон или стеклокомпозит.

Стеклокомпозитные трубы для микротоннелирования обладают рядом конкурентных преимуществ по сравнению с железобетонными или стальными трубами:

- отсутствие коррозии;
- низкая масса;
- снижение толщины стенки трубы из-за высоких механических характеристик;
- высокая пропускная способность за счет низкой шероховатости внутренней поверхности и увеличенного внутреннего диаметра за счет снижения толщины стенки;
- низкая шероховатость наружной поверхности обеспечивает снижение усилия при продавливании, что позволяет увеличивать длину проходки;
- герметичные муфтовые соединения [2].

В настоящее время актуальной задачей является исследование механических характеристик стеклокомпозитных труб для микротоннелирования для определения расчетных характеристик при продавливании.

Цель

Исследование прочности на сжатие стеклоком-

позитных труб для микротоннелирования на элементарных образцах и конструктивно-подобных элементах для определения коэффициентов запаса прочности стеклокомпозитных труб.

Стеклокомпозитные трубы для микротоннелирования проектируются с учетом конкретных условий объекта строительства: диаметра прокладываемого трубопровода, геологии, геодезии, глубины заложения, максимальной длины продавливания и т.д. В связи с многообразием исходных условий и с целью подбора оптимального по стоимости, надежного решения ООО «НТТ» разработан широкий диапазон номенклатуры выпускаемых номинальных диаметров стеклокомпозитных труб: не менее 30 стандартных диаметров в диапазоне от 300 до 2500 мм, при этом для каждого диаметра предусмотрен свой диапазон толщин стенок трубы (в среднем 10 вариантов на каждый диаметр). Столь широкая номенклатура приводит к высокой вариативности состава и структуры материала для стеклокомпозитных труб на основе механических характеристик которых, требуется проводить расчеты на продавливание.

Для расчета площади поперечного сечения (F_m) стенки трубы для микротоннелирования может быть применена следующая формула:

$$F_m = \frac{(P_w + P_e) \cdot \pi \cdot \left(\frac{D_{нар}}{2}\right)^2 + \beta L \cdot [(\pi D_{нар} q + G) \cdot \mu_{тр} + \pi D_{нар} C']}{\sigma} \quad (1)$$

Исходные данные для расчета на продавливание по формуле (1) приведены в табл. 1.

Таблица 1. Исходные данные для расчета на продавливание.

№	Наименование	Обозначение	Размерность
1	Наружный диаметр трубы	$D_{нар}$	м
2	Диаметр трубы под муфту	$D_{муф}$	м
3	Масса 1 м трубы	m	кг
4	Толщина грунта до верха трубы	h	м
5	Удельный вес грунта	γ_n	кН/м ³
6	Режущая сила	P_e	МПа
7	Горизонтальное горное давление	P_w	МПа
8	Суммарное вертикальное давление	q	МПа
9	Масса погонного метра трубы	G	м/кг
10	Коэффициент трения	$\mu_{тр}$	-
11	Адгезионное сцепление	C'	МПа
12	Расчетное напряжение сжатия	σ	МПа

№	Наименование	Обозначение	Размерность
13	Коэффициент, зависящий от типа грунта	β	-

Как видно из формулы (1) расчетное напряжение сжатия (σ) во многом определяет необходимую для продавливания толщину стенки стеклокомпозитной трубы для микротоннелирования.

Характер разрушения трубы для микротоннелирования в процессе продавливания происходит вследствие местной потери устойчивости, что характерно для ПКМ.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования выбрана стеклокомпозитная труба для микротоннелирования, структура стенки которой представляет собой, как минимум, трехслойную полимерно-композиционную оболочку, состоящую из: полимерной матрицы, непрерывных стеклянных волокон, рубленых стеклянных волокон, кварцевого песка. Стеклокомпозитная труба для микротоннелирования изготавливается методом непрерывной намотки [3].

Из труб стеклокомпозитных для микротоннелирования номинальным диаметром (DN) 718 мм, номинальной кольцевой жесткостью (SN) 128000 Па, были изготовлены следующие конструктивно-подобные и элементарные образцы для испытаний:

1. Конструктивно-подобные образцы в виде труб длиной 1500 мм с фрезерованной частью под муфту с двух сторон;
2. Конструктивно-подобные образцы в виде труб длиной 1500 мм с фрезерованной частью с двух сторон и установленной форсункой в стенке трубы;
3. Конструктивно-подобные образцы в виде труб длиной 1500 мм с фрезерованной частью с двух сторон, соединенные стальной муфтой между собой.
4. Элементарные образцы длиной 40 мм (вдоль оси трубы), шириной 25 мм и толщиной (высотой) 25 мм, вырезанные из труб для микротоннелирования, размеры образцов были подобраны в соответствии с требованиями ГОСТ 4651-2014 по формуле:

$$\varepsilon_c \leq 0,4 \frac{x^2}{l^2}, \quad (2)$$

где, ε_c - максимальная номинальная относительная деформация при сжатии, которая достигается при испытании, безразмерная величина; x - диаметр цилиндра, наружный диаметр трубы или толщина (наиболее короткая сторона поперечного сечения) призмы, в зависимости от формы образца, мм; l - длина образца, измеренная параллельно направлению сжимающей силы, мм [4].

Аппаратурой для испытаний элементарных образцов являлась универсальная испытательная Zwick/Roell Z100.

Испытания конструктивно-подобных образцов проводились с помощью силовозбудителей усилием 100 тс (8 шт.), обвязанных общим коллектором.

Результаты и их обсуждение

Для определения упруго-прочностных характеристик на сжатие проведены испытания элементарных образцов по ГОСТ 4651-2014 (ISO 604:2002). Результаты испытаний приведены в табл. 2.

По результатам испытаний установлено, что прочность стеклокомпозитной трубы на сжатие в осевом направлении составила 110 МПа (среднеарифметическое значение), модуль упругости составил 1170 МПа.

Таблица 2. Механические свойства образцов из трубы для микротоннелирования (нагружение вдоль оси трубы).

№ образца	Прочность на сжатие при $23 \pm 3^\circ\text{C}$, σ_m , МПа	Модуль упругости при $23 \pm 3^\circ\text{C}$, Е, МПа
1	110	1140
2	115	1190
3	120	1200
4	110	1150
5	100	1160
6	105	1140
7	110	1180
8	105	1210
9	110	1200
10	110	1130
$\bar{x}$	110	1170
$i_{\min} - i_{\max}$	100 - 120	1130-1210
CV	5,0	2,5

Примечание: $\bar{x}$ – среднее арифметическое значение; $i_{\min}$ – минимальное и максимальное значения; CV – коэффициент вариации, %.

По полученным значениям прочности был рассчитан коэффициент запаса прочности (N), заложенный в значение допустимой нагрузки ($F_{\max} = 1645$ кН) в ТУ 22.21.21-004-99675234-2019 по формуле:

$$N = \frac{\sigma_m \cdot \left(\frac{\pi}{4} (D_{\text{нар}}^2 - d_{\text{внутр}}^2) \right)}{F_{\max}}, \quad (3)$$

где, σ_m – разрушающее напряжение при сжатии (прочность при сжатии) $D_{\text{нар}}$ – наружный диаметр; $d_{\text{внутр}}$ – внутренний диаметр; $F_{\max}$ – максимальное допустимое усилие при продавливании.

Коэффициент запаса прочности при $\sigma_m = 110$ МПа составил 5,76.

Однако столь высокий коэффициент запаса прочности, рассчитанный на основе значений прочности элементарных образцов не включает в себя потерю устойчивости при продавливании труб, соединенных муфтой между собой. Так технологические допуски внутреннего и наружного диаметров, допуски при фрезеровке торцов труб, смещение пятна контакта двух торцов труб в муфтовом соединении и т.д., в значительной степени снижают значения разрушающего усилия при продавливании.

С целью определения влияния факторов потери устойчивости на значения максимального напряжения были проведены испытания труб и сборок из труб на сжатие. Результаты испытаний приведены в табл. 3.

По полученным значениям максимального напряжения при сжатии образцов труб и сборов из труб σ был рассчитан коэффициент запаса прочно-

сти (N), заложенный в значение допустимой нагрузки ($F_{\max} = 1645$ кН) в ТУ 22.21.21-004-99675234-2019 по формуле (2).

Коэффициент запаса прочности при $\sigma = 84$ МПа составил 4,40.

Снижение коэффициента запаса прочности связано с повышением влияния факторов потери устойчивости при испытании на сжатие.

Фотография образца приведена на рис.1.



Рис. 1. Общий вид сборки из труб DN 718 SN 128000 из двух образцов по 1500 мм с фрезерованными частями под муфту, соединенных стальной муфтой между собой в испытательном стенде.

Таблица 3. Результаты испытаний микрощитовых труб DN 718 SN 128 000 на сжатие.

№ п/п	Описание образцов	N _{сж} , кН	E, МПа	δ, %	σ, МПа
1	Образец 1500 мм длиной с фрезерованной частью под муфту с двух сторон.	5521,1	9272	0,67	88,1
2		5301,5	8758	0,68	85,0
3	Образец 1500 мм длиной с фрезерованной частью с двух сторон и установленной форсункой в теле трубы.	5756,5	9782	0,65	91,2
4		5729,0	9752	0,63	89,9
5	Сборка из двух образцов по 1500 мм длиной с фрезерованными частями под муфту, соединенных стальной муфтой между собой	4783,7	8524	0,69	76,5
		4913,1	9257	0,61	77,9
		5017,1	8686	0,70	79,7
Среднее значение		5311	9232	0,66	84
Коэффициент вариации CV, %		7,0	5,7	4,9	6,7

В ходе работы были определены упруго-прочностные характеристики элементарных образцов, вырезанных и испытанных по направлению оси стеклокомпозитной трубы для микротоннелирования DN 718 мм SN 128 000 Па. По результатам

испытания были определены прочность (110 МПа по среднеарифметическому значению) и модуль упругости (1170 МПа по среднеарифметическому значению). На основании полученных данных по механической прочности рассчитан коэффициент запаса прочности стеклокомпозитной трубы, который составил 5,76.

С целью определения влияния факторов потери устойчивости на значения максимального напряжения (прочности) были проведены испытания конструкций: труб и сборок из труб на осевое сжатие были проведены испытания образцов труб стеклокомпозитных щитовых DN 718 мм SN 128000 Па на осевое сжатие.

Среднее арифметическое значение прочности $\sigma = 84$ МПа, коэффициент запаса прочности составил 4,40.

1. Мельников Д.А., Иванов С.В., Антошин В.А. Стеклокомпозитные трубы и изделия из них: заданное сочетание эксплуатационных и технологических свойств // Наилучшие доступные технологии водоснабжения и водоотведения. – 2020. – № 6. – С. 22-23.
2. R.L. Sterling, Developments and Research Directions in Pipe Jacking and Microtunneling, Underground Space. 2018. 36 с., DOI: <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2018.09.001>.
3. Труба стеклокомпозитная для напорных и безнапорных трубопроводов, прокладываемых методом микротоннелирования: пат. 2717728 Рос. Федерация; заявл. 24.10.19, опубл. 25.03.20, Бюл. № 9.
4. Мельников Д.А., Ильичев А.В., Вавилова М.И. Сравнение стандартов для проведения механических испытаний стеклопластиков на сжатие// Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн., 2017. №3. Ст. 6. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 28.03.2021). DOI 10.18577/2307-6046-2017-0-3-6-6.

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ, ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ДЛЯ ОБРАБОТКИ АЛГОРИТМАМИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Я.В. МIRONENKO

Акционерное общество «РЭС Групп», Владимир, Россия; mironenko@orem.su

Приоритетным в развитии диагностики в энергетике становится создание аналитических программных продуктов, нацеленных на оценку состояния электрооборудования. Предложен метод анализа данных диагностического мониторинга с использованием алгоритмов машинного обучения для экспертной оценки наиболее информативных и доступных для мониторинга диагностических параметров. Полученные высокие значения точности работы нескольких диагностических моделей, использующих алгоритмы машинного обучения, говорят о перспективности использования предложенного подхода.

На сегодняшний день задача повышения достоверности и информативности диагностики электроэнергетического оборудования является не только приоритетом программы цифровизации энергетики, установленной правительством Российской Федерации [1], но и залогом функционирования энергетической системы страны в условиях, когда до 70% основных фондов отрасли физически и морально изношены [2], а размер инвестиционной программы системообразующей сетевой организации - ПАО Россети с 2020 по 2024 год планомерно снижается на 38,5% [3].

Как следует из заявленной государственной программы, речь не идет о совершенствовании способов получения диагностической информации. Технические характеристики измерительных приборов и оборудования для мониторинга диагностических параметров достаточны для решения поставленных задач. Драйвером для достижения ключевых показателей становятся системы анализа и обработки данных диагностического мониторинга, т.е. меняется подход к интерпретации измеренных и зафиксированных значений.

Диагностическое обследование носит экспертный характер. Вывод о состоянии конкретной единицы принимается в зависимости от комбинации различных факторов, и интерпретируется соответственно. Универсальный подход не закреплен на сегодняшний день никаким нормативным документом и выбирается конкретным экспертом. В условиях ограниченности количества таких специалистов, вывод может делать экспертная компьютерная система.

Развитие искусственного интеллекта в последние годы позволяет говорить о возможности такого применения экспертных систем, построенных на базе нечеткой логики, или машинного обучения [4].

В электроэнергетике существует большое количество различного по своей структуре, технологии производства и эксплуатации оборудования, что затрудняет анализ диагностических данных. Технологии диагностики отличаются для высоковольтного выключателя, генератора и трансформатора. При этом интерпретация диагностических данных для масляного выключателя 10 кВ и 220 кВ также различается. Но даже для однотипного оборудования возникает сложность в построении универсальной

экспертной диагностической системы связанная с характером данных диагностического мониторинга, получаемых по результатам обследования. Отсутствие систем on-line мониторинга не позволяет оценивать тренд развития параметров. В отдельных видах обследования данные, получаемые по результатам измерения различным оборудованием существенно различаются. Так в настоящий момент в государственном реестре средств измерения содержится более 20 средств мониторинга ЧР различных производителей. Единого стандарта передачи результатов измерения нет, а некоторые встроенные в оборудование программные комплексы просто не позволяют пользователю получить данные непосредственно измерений и выдают только усредненные значения. При эксплуатации на одном предприятии может использоваться различной диагностическое оборудование, а для географически распределенных объектов еще одной проблемой становится отсутствие единой базы данных и даже подхода к диагностике. Все это формирует уникальную, разнородную структуру данных, полученных в ходе диагностического обследования, и используемых в экспертной системе.

Эти данные формируют итоговую выборку, необходимую для создания диагностических моделей, использующих машинное обучение. В зависимости от характеристики получившейся выборки разные технологии дают разный результат. Как правило, диагностические выборки характеризуются несбалансированностью (доля событий, указывающих на неисправность существенно меньше доли, подтверждающей исправное состояние), сравнительно небольшим размером (единая база данных диагностических обследований отсутствует, и результаты замеров практически не используются вне рамок конкретного обследования), относительно большим смещением данных диагностического обследования (для некоторых видов обследования для однотипного оборудования результаты мониторинга могут отличаться в несколько раз).

Указанные характеристики выборки существенно снижают количество доступных методов машинного обучения. Наиболее эффективным выглядит использование ансамблевых методов: бэггинга, бустинга и нейронных сетей [5]. Но в независимости от ис-

пользованных технологий, построение экспертных систем требует огромного количества используемых для их обучения исходных данных, которыми являются результаты прошедших исследований в сравнении с выявленными дефектами. Наполнение такой базы вручную представляется достаточно сложной задачей, особенно при низком количестве внедрений диагностических комплексов, обусловленным высокой стоимостью оборудования.

Для снижения несбалансированности выборки и ее объемного увеличения в части информативных данных можно использовать такие диагностические параметры, которые с одной стороны легко получать, а с другой хранить в течение продолжительного времени. Это позволит при необходимости провести их ревизию после аварийной ситуации и получить, таким образом, более сбалансированные данные для выборки.

Наиболее перспективными для такой цели являются те диагностические методы, которые уже сейчас сочетают в себе хотя бы две из следующих необходимых особенностей: простоту и возможность автоматизации процесса, информативность, надежность.

На сегодняшний день анализ концентрации растворенных газов в трансформаторном масле является одним из самых информативных [6], но в тоже время наименее автоматизированных диагностических методов. Его использование в алгоритмах машинного обучения, как правило, ограничивается параметром «target» в обучающей и контрольной выборке.

Достаточно информативным on-line методом является контроль электрических параметров в изоляции трансформатора. За счет активного использования АСУ ТП и телемеханики, этот метод является наиболее автоматизированным на уровне измерений. Существует несколько диагностических методов, позволяющих обнаружить дефекты посредством мониторинга электрических параметров, но наиболее распространенным является измерение реактивного сопротивления обмотки. Выявление изменения данного сопротивления позволяет диагностировать нарушение формы обмотки, т.е. витковые дефекты. Замеры реактивного сопротивления, как правило, проводятся при подаче внешнего импульса (для on-line диагностики таким импульсом является коммутационный или грозовой импульс, или коронный разряд). Основная причина сравнительно нечастого использования метода, - сложность получения и обработки достоверной информации, что в свою очередь существенно снижает надежность метода.

Для быстрой и дешевой оценки состояния электрооборудования уже сейчас используется мониторинг частичных разрядов (ЧР). Данный метод диагностики является с одной стороны достаточно дешевым, а с другой информативным инструментом, который может использоваться наряду с лабораторными диагностическими методами [6]. Наиболее важная проблема технологического развития мониторинга ЧР также заключается в сложности экс-

пертной интерпретации данных, полученных регистраторами [7], что делает данный метод интересным для использования в моделях, использующих машинное обучение.

Еще одним перспективным методом диагностики является мониторинг температуры. С одной стороны, данные мониторинга могут быть получены достаточно легко, а с другой их интерпретация требует использования специальных экспертных алгоритмов.

Перечень перспективных для целей обработки моделями машинного обучения, диагностических параметров на примере маслонаполненного трансформатора представлен в таблице 1. Все указанные параметры являются с одной стороны, достаточно информативными, а с другой сложно интерпретируемым для целей диагностики. Наблюдение и оценка отдельных параметров в течение продолжительного времени позволяет более объективно оценить состояние объекта и обнаружить возникающие дефекты на ранних стадиях.

Таблица 1. Диагностические параметры, перспективные для использования в диагностических моделях, использующих машинное обучение

Наименование параметра	Источник данных о параметре
Изменение температуры в баке трансформатора за продолжительное время (долговременный тренд)	Датчик температуры бака трансформатора и датчики измерения температуры окружающей среды
Кажущийся заряд ЧР внутри бака трансформатора (долговременный тренд)	Датчик частичных разрядов СВЧ диапазона частот в баке трансформатора
Изменение влажности трансформаторного масла за продолжительное время (долговременный тренд)	Датчик влагосодержания в масле бака трансформатора
Кажущийся заряд ЧР в высоковольтных вводах	Датчик регистрации токов проводимости и ЧР в высоковольтных вводах
Изменение температуры высоковольтных вводов (долговременный тренд)	Датчика температуры ввода, тепловизоры и датчики измерения температуры окружающей среды
Температура масла в баке трансформатора (кратковременный тренд)	Датчик температуры бака трансформатора и датчики измерения температуры окружающей среды
Кажущийся заряд ЧР внутри бака трансформатора (кратковременный тренд)	Датчик частичных разрядов СВЧ диапазона частот в баке трансформатора

Примечание. При выборе отдельных параметров необходимо учитывать условия внешней среды (температуру) и уровень внешних помех.

Для оценки состояния изоляции маслонаполненных трансформаторов были разработаны 4 диагностические модели, которые использовали разные алгоритмы машинного обучения и данные по мониторингу различных диагностических параметров, в качестве исходных (данные «features» в машинном обучении).

Точность модели на тестовой выборке рассчитывалась как отношение числа истинных прогнозов в тестовой выборке (истинность прогноза подтверждалась тождественностью прогноза и результата

другого диагностического обследования – данных «target» в машинном обучении) к общему числу прогнозов в тестовой выборке. Полученные результаты представлены на рис.1. Была достигнута достаточная точность вывода о состоянии высоковольтного энергетического оборудования при применении моделей машинного обучения.



Рис. 1. Достигнутая точность диагностических моделей, использующих машинное обучение

Точность работы каждой модели не ниже 0,65, при этом лучшие результаты были достигнуты при использовании разных диагностических параметров – температуры/влажности масла и кажущегося заряда ЧР. Высокая точность данных алгоритмов в первую очередь объясняется характеристиками выборки – сравнительно небольшим размером с большим смещением.

Достигнутые результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Указанные диагностические параметры могут с успехом использоваться в алгоритмах машинного обучения для диагностики высоковольтного оборудования
2. Наиболее перспективным выглядит реализация диагностических моделей с использованием параметров, легко получаемых в большом объеме, но сложно интерпретируемых: показатели ЧР, температура.
3. Дальнейшее развитие модели должно осуществляться за счет расширения обучающей выборки и детализации моделей для различного типа оборудования.

1. Описание ведомственного проекта Министерства энергетики Российской Федерации «Цифровая энергетика». URL: <https://digital.gov.ru/uploaded/files/vedomstvennyiy-proekt-tsifrovaya-energetika.pdf> (дата обращения: 08.04.2021)
2. В.В. Андросов, С.С. Чернов. Экономическое содержание стоимости и инвестиционная активность энергопредприятий. ВЕСТНИК ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления, №26, 2018.
3. Инвестиционная программа ПАО "РОССЕТИ". URL: <https://www.rosseti.ru/investment/dzo/long/> (дата обращения: 13.07.2021)
4. Шахнин В.А., Мироненко Я.В. Применение методов нечеткой логики для электрошумовой диагностики высоковольтного оборудования. //Сборник докладов X-ой Юбилейной Международной научной конференции «Актуальные вопросы современной техники и технологии». / Липецк: Издательский центр «Гравис», 2013;
5. Fenton, W., McGinnity, T., Maguire, L.: Fault diagnosis of electronic systems using intelligent techniques: a review. IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics – Pt. C 31(3), 269–281 (2000)
6. Русов В.А. Диагностический мониторинг высоковольтных силовых трансформаторов / Пермь: DIMRUS, 2013
7. Вдовико В.П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования. / Новосибирск: Наука, 2007;
8. Шахнин В.А., Чебрякова Ю.С., Мироненко Я.В. Статистические характеристики частичных разрядов как диагностические признаки состояния изоляции высоковольтного оборудования // Контроль. Диагностика. - 2015. - №2. - С. 59-65.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ СМЕШАННОЙ СМАЗКЕ

А.В. Михеев, А.Б. Тохметова⁺, М.А. Тананов

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; ⁺aygerim.tokhmetova@mail.ru

Проведено сравнительное исследование по трибологическим свойствам моторного масла с добавлением двух специализированных присадок. Рассмотрены свойства, характеризующие смазки, а также определены наиболее существенные эксплуатационные свойства. Сделаны выводы о влиянии температуры на смазочный слой.

Ключевые слова: коэффициент трения, наномодификатор, моторное масло, температура.

Введение.

Смазочный материал играет ключевую роль для обеспечения надежности машин и механизмов [1,2]. Создание и применение новых высококачественных материалов является весьма актуальной задачей в машиностроении [3,4]. Одним из возможных решений проблемы повышения эксплуатации техники является введение в моторное масло наномодификатора для улучшения режимов трения и смазки [5,6].

Целью исследования является проведение сравнительных экспериментальных исследований трибологических свойств наномодификаторов, по методике, разработанной в лаборатории трения в экстремальных условиях ИМАШ РАН.

Материалы и методы.

Объектом исследования является моторное масло с наномодификатором 1 и наномодификатором 2. Трибологические испытания двух специализированных смазок проводились при нагрузках 150, 300, 450 Н, с частотой вращения 50, 100, 300 об/мин.

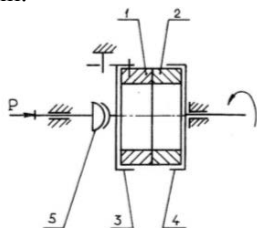


Рис. 1. Схема испытаний кольцо-кольцо:

1 - невращающийся образец-кольцо; 2 - вращающийся образец-кольцо; 3 - держатель образца 1, обеспечивающий возможность самоустановки; 4 - образцедержатель вращающегося образца; 5 - сферический шарнир.

Испытания проводили на универсальной машине трения УМТ-1 по схеме «кольцо-кольцо» (рис.1). Для лабораторных исследований использовали капельную схему смазывания. Образцы для триботехнических испытаний изготавливали из стали, чугуна и бронзы.

Результаты.

При рассмотрении графиков (рис. 2) видим влияние скорости вращения на моторное масло с наномодификаторами для пар «сталь-бронза», «сталь-чугун» и «чугун-бронза». Из рис. 2,б и рис.

2,в видно, что коэффициент трения снижается, а на рис. 2,а положительный эффект наномодификатора наблюдается, начиная со скорости вращения 26,4 м/мин.

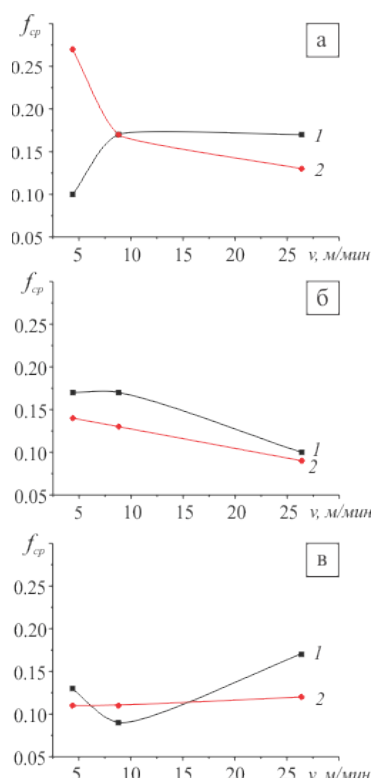


Рис. 2. Результаты испытаний пар трения при нормальной нагрузке 150 Н: а – «сталь-бронза», б – «сталь - чугун», в – «чугун-бронза», 1 – наномодификатор 1, 2 – наномодификатор 2.

Нагрузка 300 Н (рис.3,а) для пары «сталь – бронза» показывает такой же характер поведения кривых, как и при нагрузке 150 Н. Из рис.3б видно, что введение наномодификатора 2 в моторное масло оказывает отрицательный эффект на трение. На этом же рисунке видно, что введение наномодификатора 1 улучшает коэффициент трения на образце «сталь-чугун». Наномодификатор 2 показывает значительно лучший результат для пары «чугун-бронза» (рис. 3,в).

В нагруженном режиме (табл. 1) моторное масло с наномодификатором 1 показало себя наиболее эффективным смазочным материалом, по сравнению с наномодификатором 2.

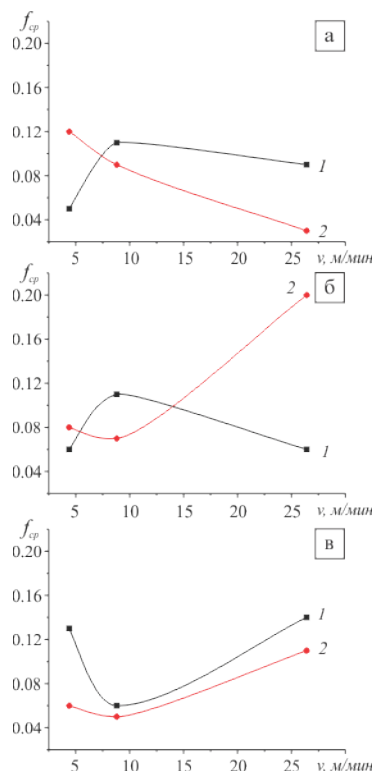


Рис. 3. Результаты испытаний пар трения при нормальной нагрузке 300 Н: а – «сталь-бронза», б – «сталь - чугун», в – «чугун-бронза», 1-наномодификатор 1, 2 – наномодификатор 2.

Табл. 1. Результаты испытаний пар трения при нормальной нагрузке 450 Н.

Пары трения	Скорость вращения, м/мин	Средний коэф.трения (с наномодиф. 1)	Средний коэф.трения (с наномодиф. 2)
Сталь-бронза	4,4	0,08	0,1
Сталь-бронза	8,8	0,09	0,08
Сталь-бронза	26,4	0,09	0,03
Сталь-чугун	4,4	0,04	0,15
Сталь-чугун	8,8	0,03	0,04
Сталь-чугун	26,4	0,1	0,14
Чугун-бронза	4,4	0,09	0,1
Чугун-бронза	8,8	0,18	0,05
Чугун-бронза	26,4	0,04	0,04

Анализируя испытания данных пар образцов, можно сделать вывод, наномодификатор 2 будет эффективен только в узком диапазоне, например при скоростях свыше 26,4 м/мин для пар трения «сталь-бронза» и «чугун-бронза».

Нагрев смазочного материала в узлах трения сильно влияет на качество смазки. Поэтому при эксплуатации оборудования необходимо контролировать температуру в зоне трибоконтакта.

За время одного оборота две металлические поверхности отнимая от теплового потока смазки две доли теплоты прогреваются на глубину h . По отдельности эти глубины распространения импульсов можно вычислить по общей формуле [7]:

$$h = 1.73\sqrt{at}, \quad (1)$$

где a – температуропроводность металла, $\text{м}^2/\text{с}$, t – время одного оборота, с.

Расчет объема бронзы, прогретого за время контакта при одном обороте:

$$V = 1.73A\sqrt{\frac{\lambda}{c\rho}}t, \quad (2)$$

где A – площадь, м^2 , t – время, с.

Аналогично найдем объем стали нагретого за время одного оборота. Из таблицы 2 видно, что бронза теплопроводна, чем сталь – она проводит в 3 раза больше тепла и ее объем нагрева несколько раз превышает объем стали.

Табл. 2. Объем нагретого металла за один оборот

Металл	V при частоте вращения 50 об/мин, м^3	V при частоте вращения 100 об/мин, м^3	V при частоте вращения 300 об/мин, м^3
Бронза	0,00025	0,00017	0,0001
Сталь	0,00014	0,0001	0,00005

В результате взаимодействия пар образцов выделяется теплота трения, благодаря этому на основании закона сохранения энергии удельную мощность трения со смазкой приравняем к теплоте генерируемой в смазочном слое отнесенной к площади и времени за оборот:

$$\tau v = \frac{Q}{At}, \quad (3)$$

где τ – напряжения сдвига, МПа, v – скорость сдвига, м/с, Q – количество теплоты генерируемое в слое, Дж, A – площадь, м^2 , t – время, с.

Количество теплоты находим по формуле:

$$Q = zA\rho c\theta, \quad (4)$$

где z – зазор, м, ρ – плотность масла, $\text{кг}/\text{м}^3$, c – теплоемкость, θ – температура, $^\circ\text{C}$.

Напряжение сдвига вычисляем по формуле:

$$\tau = \mu \frac{v}{z} \quad (5)$$

где μ – динамическая вязкость, $\text{Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$.

Подставляя зависимости (4) и (5) в (3) получим формулу для оценки температуры в слое смазки.

$$\theta = \frac{\mu v^2 t}{z^2 \rho c} \quad (6)$$

По результатам, представленным в таблице 3 можно сделать вывод, что температура возрастает

в смазочном слое, поскольку увеличивается скорость вращения образца.

Табл. 3. Средние температуры в смазочном слое при $z = 2$ мкм

Скорость вращения, м/мин	Средняя температура смазки, °C
4,4	14
8,8	30
26,4	87

Заключение.

Проведенные исследования контактирующих пар на УМТ-1 показали значительно лучшие трибологические показатели наномодификатора 2 на основе серпентинита по сравнению с наномодификатором 1.

Наиболее эффективно наномодификатор 2 проявил себя в парах «сталь-чугун» и «чугун-бронза» при нормальной нагрузке 150 Н и 300 Н. В нагруженном режиме при 450 Н введение наномодификатора 2 коэффициент трения, наоборот, повышает. Минимальная средняя температура исследуемых пар трения, 14 °C, достигается при скорости 4,4 м/мин.

Данная работа доказывает тесную взаимосвязь таких параметров, как коэффициент трения, температура и скорость вращения. Оценка температуры в смазочном слое показала, что моторное масло с наномодификаторами отводит тепловой поток от трущихся поверхностей при увеличении скорости вращения. Данный показатель является важным фактором для равномерного распределения тепла по всему объёму системы.

- [1] Мышкин Н.К. Трение, износ, смазка. Физические основы и технические приложения трибологии / Петроковец М.И. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 368с.
- [2] Медеяев А.Ю. Трение и износ деталей машин / Албагачиев А.Ю. – М. 2008. – 461с.
- [3] Доценко А.И. Основы триботехники / Буяновский И.А. – М.: Инфра-М, 2014. – 336с.
- [4] Заславский Ю.С. Трибология смазочных материалов. – М.: Химия, 1991.
- [5] Албагачиев А.Ю., Михеев А.В., Хасьянова Д.У., Тананов М.А. Трибологические исследования смазок // Проблемы машиностроения и надёжности машин, 2018. № 5.
- [6] Албагачиев А.Ю. Порошковые материалы: Справочник / Коллектив авторов / Под ред. М.И. Алымова и Ю.В. Левинского – М.: Научный мир, 2018 – 610 с.
- [7] Справочник по триботехнике / Под ред. М. Хедбь, А.В. Чичинадзе. В 3 тт. Т.1. Теоретические основы. М.: Машиностроение, 1989.

КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ И ПОКРЫТИЙ: НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ

Ю. В. Могильников¹, М. Виноградов²

¹ ООО «Сайнтифик» Санкт-Петербург, Россия; y.mogilnikov@sntf.ru

² RTEC-Instruments Inc, San José (CA), США; info@rtec-instruments.com

Введение

Современный мир немислим без использования плёнок и функциональных покрытий, используемых для различных целей и на различных изделиях, от мягких полимерных, лакокрасочных и декоративных до твёрдых алмазоподобных и керамических, от низкотемпературных до жаропрочных. Также, случившийся за последние десятилетия бум открытия новых функциональных материалов и покрытий практически во всех областях науки и техники требует от учёных и инженеров не только измеримых характеристик покрытий, но и прогнозирования их физико-механических свойств в реальных условиях эксплуатации изделий, будь то пластиковая шариковая ручка с металлизацией, металлическая дверная ручка, покрытая лаком, оптическая линза с просветлением, защитное покрытие химического реактора или лопатка турбины самолёта, а также многообразие композиционных материалов.

Для определения комплекса физико-механических свойств покрытий и материалов, будь то износ покрытия, включая время его жизни, адгезия или когезия к подложке или субстрату, а также топографии поверхности, до недавнего времени существовало множество различных приборов. Такие приборы в большинстве своём по отдельности реализовали функции по исследованию износа покрытий и материалов при различных нагрузках (трибометры), изучения стойкости к царапанию (скретч-тестеры), измерения твёрдости (твёрдомеры), определения износа при высокочастотных вибрациях покрытий или материалов (фреттинг-машины) и изучения топографии поверхности (профилометры).

Описание системы

В течение последнего десятилетия компания RTEC Instruments (США) ведёт разработки серии приборов в области комплексного исследования вышеупомянутых свойств покрытий для проведения исследований и физико-механических свойств покрытий и материалов на одном приборе в условиях максимально приближённым к реальным условиям эксплуатации. Результатом этих разработок стала многофункциональная система MFT-5000, реализующая концепцию сменных функциональных модулей на одной платформе, в которую интегрирована система создания вертикальной нагрузки «сверху-вниз» и система перемещения образца между испытательным модулем и модулем визуализации.

На платформе установлена прочная П-образная

рама, на которой установлены 2 системы вертикального перемещения с ходом 180 мм: 1-я система предназначена для реализации вертикальной нагрузки, а 2-я для перемещения системы 3D визуализации измерения.

В специальный универсальный слот 1-й системы устанавливаются датчики измерения вертикальной и тангенциальной нагрузки с держателями контртела или приводами вращения. Пьезоэлектрические, ёмкостные или тензометрические датчики нагрузки и силы трения, установленные в сменные модули, позволяют исследователю работать в широком диапазоне нагрузки и силы трения от мН до 12000 Н.

Системы визуализации, которыми может комплектоваться прибор, представляют собой или WLI (White Light Interferometry) интерферометр белого света или Комбинацию конфокального 3D профилометра типа «Нипков диск» и WLI интерферометра. Обе эти системы визуализации также имеют встроенный видеомикроскоп.

Методы исследований

Система MFT-5000 при помощи сменных модулей реализует практически все геометрии контакта известные в **трибологии**: «тело-контртело» или «индентор-поверхность»: шар-диск, штифт-диск, диск-диск, блок на кольцо, Тимкен тест, 4-х шариковый тест и др.

Нижняя моторизованная платформа с ходом 210x310 мм с разрешением 0.1 мкм и скоростью перемещения до 50 мм/сек, расположенная под модулями нагрузки и визуализации, служит для установки модулей движения: вращения (от 0,01 до 30000 об/мин), возвратно-поступательного движения (ход от 0,1 до 30 мм и частотой до 80 Гц), высокочастотных колебаний (фреттинг до 500 Гц с ходом от 5 мкм до 4 мм), модуля вращения вала для установки втулок, подшипников (вращение до 7000 об/мин на 360°), системы изучения трибокоррозии 4-х электродным методом. Эта платформа служит и для перемещения образца под модуль визуализации изменений поверхности до после и в ходе эксперимента. Также эта моторизованная платформа участвует и в реализации движения по сложной траектории при исследовании износа и скретч-тестировании, например, типа «8», «□», «0», «спираль» и др.

Оснащение верхнего сменного модуля нагрузки-силы трения алмазным индентором позволяет превратить прибор в **скретч-тестер** и проводить измерительное царапание для оценки адгезии по-

крытия или плёнки к субстрату в следующих диапазонах вертикальных нагрузок до 1 Н, до 50 Н и до 200 Н. При этом в ходе проведения царапины по поверхности задаются следующие параметры: начальная и конечная нагрузка, длина царапины, а регистрируются: сила трения и коэффициент, глубина, акустическая эмиссия в зависимости от времени или по длине царапины. После сканирования царапины при помощи конфокального микроскопа, в программном обеспечении происходит наложение изображения царапины на все графики данных по длине царапины, что позволяет сопоставить видимые разрушения поверхности с измеренными параметрами. Длина царапины ограничена только ходом нижней платформы и размерами образца.

Оснащение системы MFT-5000 сменными модулями вертикальной нагрузки с инденторами Роквелла, Виккерса, Берковича превращает платформу в систему измерения твёрдости покрытий и материалов методом **инструментального индентирования** в диапазоне от 1 мН до 200 Н, что в квазистатическом или динамическом режиме приложения нагрузки к индентору позволяет измерить модуль упругости E , твердость H , ползучесть / релаксацию напряжений, трещиностойкость за одно измерение! При проведении такого типа измерений система строит зависимость вертикальной нагрузки от глубины погружения индентора в материал, как при увеличении, так и при снятии нагрузки. Оборудование нижней подвижной платформы высокотемпературной камерой с заполнением инертным газом позволяет проводить измерение твёрдости по Роквеллу одновременно серии образцов при температурах до 1200°C.

Каждый из функциональных модулей изучения трибологии, проведения скретч-теста и индентирования можно оснастить **специальными камерами и приспособлениями** для проведения испытаний в различных условиях эксплуатации изделий и материалов:

- при температурах от -120°C до 1200°C;
- при влажности от 5 до 90%;
- при испытаниях в вакууме;
- при испытаниях в жидкостях, маслах, смазках;
- при испытаниях в атмосфере инертного газа;
- в условиях коррозионного процессе износа;
- при испытаниях в среде солевых растворов;
- при высоком давлении инертных газов.

Вышеописанные модули, приспособления и устройства, которыми может комплектоваться система сменные, то есть можно, сняв один измерительный или функциональный модуль и, установив другой, можно изменить функционал машины. То есть система MFT-5000 представляет собой универсальный инструмент с практически неограниченными возможностями для исследований в областях трибологии, измерительного царапания и индентирования.

Конструкция прибора и некоторые алгоритмы его работы отражены в патентах [1,2].

Примеры исследований.

В университете Циньхуа, Китай проводили исследование о комбинированном влиянии образования пограничного слоя и сглаживания поверхности при трении и изучали скорость износа смазываемых точечных контактов при нормальных процессах приработки [3].

Австралийские ученые разработали новую смазку на водной основе с добавкой наночастиц для проката стали [4].

Трибокоррозию тонких стеклянных плёнок на основе оксида циркония исследовали учёные из США [5].

Трибологические свойства композитов на основе СВМПЭ с различной морфологией встречной поверхности также исследовали в Шанхайском университете [6].

Влияние толщины покрытия на износостойкость покрытия Inconel 625 исследовали учёные из Южной Африки [7].

В университете Калифорнии, США, исследовали срок службы сухой смазывающей пленки MoS₂, легированной никелем [8].

Механическое поведение напылённых тонких плёнок алюминия при высоких нагрузках скольжения также исследовали африканские учёные [9].

Влияние содержания углерода на структуру и трибокоррозионные свойства покрытий TiSiCN на Ti6Al4V исследовали китайские учёные [10].

Исследование консистентной смазки самосмазывающихся подшипниковых материалов 60 NiTi было выполнено американскими учёными [11].

1. US Pat. US 20180024035A1
2. US Pat. US 010132733B2
3. Zhang Y., Kovalev A., Meng Y. Combined effect of boundary layer formation. // Friction, 2018, V. 6 (3). P. 274–288
4. Wu H., Jia F., Li Z., Novel water-based nanolubricant with superior tribological performance in hot steel rolling. // Int. J. Extrem. Manuf. 2020. V.2. Art 025002.
5. Wanga W., Mraiedb H., Diyatmikac W. Effects of nanoscale chemical heterogeneity on the wear, corrosion, and tribocorrosion resistance of Zr-based thin film metallic glasses. // Surface & Coatings Technology/ 2020, V. 402. Art. 126324.
6. Wang Y., Yin Z., Li H. Tribological behaviors of UHMWPE composites with different counter surface morphologies. // Materials Science and Engineering. 2017. V.272. Art. 012022.
7. Phiri R., Oladipo O., Maledi N., Akinlabi E. Effect of Coating Thickness on Wear Performance of Inconel 625 coating. // Materials Science and Engineering 2018. V 423. Art. 012159
8. Vellore A., Garcia S., Walters N., et all. Ni-doped MoS₂ Dry Film Lubricant Life // Advanced Materials Interfaces 2020 preprint.
9. Mwema F., Akinlab E., Oladipo O., Mechanical Behavior of Sputtered Aluminium Thin Films under High Sliding Loads. // Key Engineering Materials 2019, Vol. 796, pp 67-73.
10. Wanga Y., Lia J., Danga C., Wanga Y., Zhub Y., Influence of carbon contents on the structure and tribocorrosion properties of TiSiCN coatings on Ti6Al4V. // Tribology International. 2017. V. 109. P. 285–296.
11. Vellore A., Walters N., Martini A. Grease Lubrication of Self-Mated 60NiTi Bearing Materials. // Frontiers in Mechanical Engineering. 2019. V. 5. Article 13.

MFT-5000 Многофункциональная система

Трибология, Скретч-тест, Индентирование

> Принципы:

- MFT-5000 - это модульный и универсальный универсальный трибометр для анализа трения, износа и механических свойств с помощью встроенного 3D профилометра.
- Шероховатость поверхности, объемный износ и топография -изменение в течение времени испытания.
- 3D профилометр может сканировать любой материал (прозрачный, темный, корродированный, плоский, изогнутый), позволяя визуализировать следы износа с крутыми склонами.
- Соответствие множеству стандартов ASTM, DIN, ISO

> Параметры:

- Платформа:
 - Макс. нагрузка: до 10'000 Н
 - Ход XY столика: 130 x 270 мм (разрешение: 0.1 мкм)
 - Ход по Z: 150 мм
 - Макс. скорость: 50 мм/сек
- Датчик нагрузки:
 - Датчик HEON 0.25 - 50 Н (разрешение: 1.5 мН)
 - 1D+ 1D датчик 20 -2'000 Н (разрешение: 60 мН)
- Вращение:
 - Макс. скорость до 5000 об/мин
 - Макс. момент: до 4.2 Нм
 - Контейнер для смазки с защитой от брызг
- Встроенный 3D Профилометр Lambda
 - Интерферометрия белого света (WLI)
 - Диск вращающийся конфокальный
 - Изображение в светлом поле
 - Изображение в темном поля
 - Визуализация с переменным фокусом



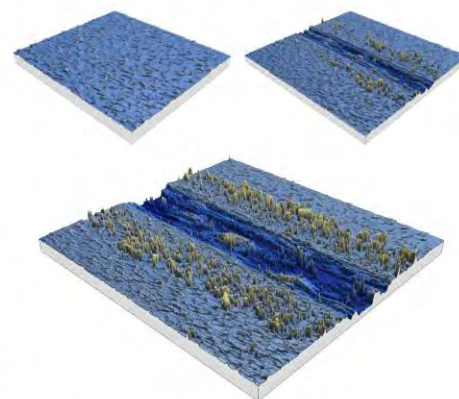
Rtec-Instruments - MFT-5000

Возможности:

- MFT-5000 работает в широком диапазоне сил и приложений, используя модульную концепцию. На платформу можно установить различные сменные модули в зависимости от типа испытаний.
- Модульная концепция позволяет испытывать покрытия, сыпучие материалы, смазочные материалы, реальные компоненты и т. д.
- Модули, датчики нагрузки и нижние приводы оснащены механизмом быстрой замены, который позволяет легко изменять конфигурации.
- Установленный модуль автоматически распознаётся прибором и ПО
- Высокоточный столик XY, который позволяет автоматически сканировать и сшивать всю дорожку износа.

Применение:

Испытания тонких или толстых пленок, смазок, мягких материалов, гидрогелей, биоматериалов, гладких или шероховатых, плоских или непланарных поверхностей, прозрачных или непрозрачных, нано- или макроуровне, покрытиях или сыпучих материалах, и др.



Развитие износа во время трибологических испытаний со смазкой

SMT-5000 Система испытаний поверхности

Индентирование и скретч

> Принципы:

- SMT-5000 - это модульный и универсальный прибор для испытаний методом измерительного царапания и индентирования для анализа твердости, износа и механических свойств с помощью встроенного 3D профилометра.
- Предназначен для изучения шероховатости поверхности, модуля упругости, ползучести, адгезии покрытий, сопротивление царапинам, толщину пленки, скорость износа и топографию, изменяющуюся со временем испытания.
- 3D профилометр может сканировать любой материал: прозрачный, темный, корродированный, плоский, изогнутый.
- Соответствие множеству стандартов ASTM, DIN, ISO

- Макс. Нагрузка: До 200 Н
- Ход XY столика: 150 x 150 мм (разрешение: 0.1мкм 100 мм)
- Ход по оси Z : мм
- Макс. скорость: 50 мм/сек

- Датчик нагрузки:
 - IST Скретч и индентирование: от 5 мН до 50 Н (разрешение: 6 мкН)
 - IIT Инструментальное индентирование: от 5 мН до 50 Н (разрешение: 6 мкН)
 - UST Скретч тестер: от 5 мН до 50 Н (разрешение: 100 мкН)

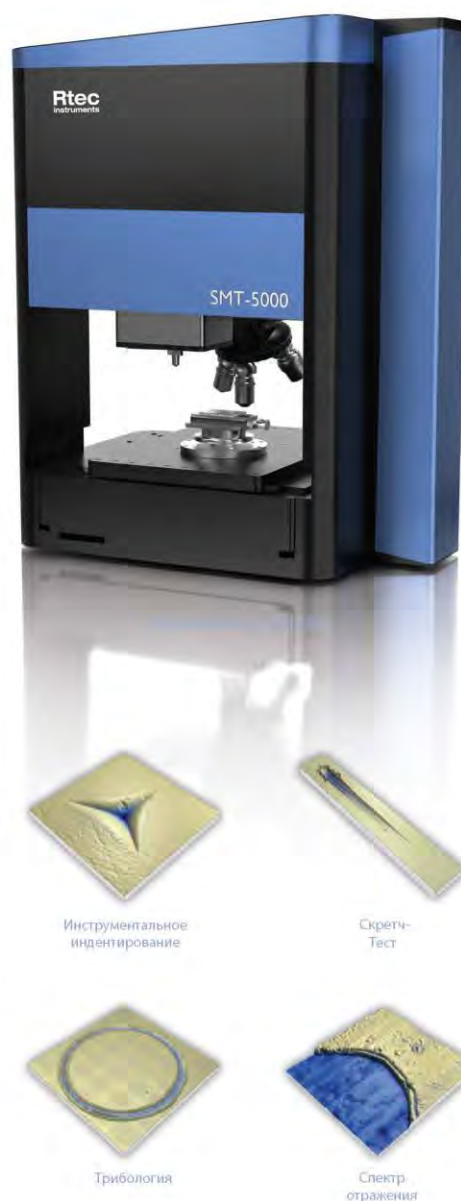
- Встроенный 3D Профилометр Lambda
 - Интерферометрия белого света (WLI)
 - Конфокальный микроскоп (Нипков диск)
 - Изображение светлого поля
 - Изображение темного поля
 - Визуализация с переменным фокусом

> Возможности:

- SMT-5000 может выполнять испытания в широком диапазоне сил и приложений, благодаря модульной концепции. На одну платформу могут быть добавлены различные быстросменные модули в зависимости от предполагаемого испытания.
- Модульная конструкция позволяет испытывать покрытия, сыпучие материалы, реальные компоненты и многое другое.
- Модули для испытаний, тензодатчики и приводы движения имеют механизмы быстрой замены, что позволяет легко изменять конфигурации.
- Установленный модуль распознаётся автоматически прибором и ПО.
- Высокоточный столик XY, который позволяет автоматически сканировать и сшивать полное изображение следа.

> Применение:

Прибор может предназначен для испытаний тонких или толстых пленок, мягких материалов, полупроводников биоматериалов, гладких или шероховатых поверхностей, плоских или шероховатых поверхностей, прозрачных или непрозрачных поверхностей, нано- или макроэлементов, оксидных покрытий, покрытий или сыпучие материалы и многое другое.



ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА КОЭФФИЦИЕНТ ТРЕНИЯ МЕЖДУ УГЛЕРОДНЫМИ ВОЛОКНАМИ

А.В. Морозов

Институт проблем механики им А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия; morozovalexei@mail.ru

Представлены результаты трибологических испытаний между углеродными волокнами по схеме перекрещивающиеся цилиндры в диапазоне температур от 23 до +300 °С. Было установлено, что коэффициент трения зависит от технологии изготовления волокна. Повышение температуры снижает коэффициент трения между волокнами.

Цель

При исследовании коэффициента трения различных композитов (УУКМ) на основе каменноугольного пека, который дискретно армировался углеродными волокнами, было показано [1], что на дорожке трения образуется тонкий модифицированный слой, который влияет на коэффициент трения. При помощи Раман-спектроскопии было определено: модифицированный слой, полученный при фрикционном разогреве УУКМ до $T = 300$ °С, преимущественно состоит из углеродных волокон. В данной работе представлены результаты исследования влияния температуры на коэффициент трения между жгутами различных углеродных волокон.

Материалы и методы

Для экспериментальных исследований были выбраны две группы углеродных волокон, отличающиеся конечной температурой прокаливания, которая влияет на их прочностные свойства. Первая группа – карбонизованные волокна (КВ) были получены при температуре финишной термической обработки $T = 1200$ °С, а вторая группа – графитированные волокна (ГВ) при $T = 2400$ °С. Следует отметить, что обе группы волокон при производстве были изготовлены в форме жгутов, которые содержали примерно 320К филаментов. В настоящем исследовании использовались углеродные волокна двух производителей, а именно: волокно УК (ООО Аргон, г. Балаково, Россия) и волокно Zoltek panex 35 (Zoltek Inc., Венгрия).

Трибологические испытания были проведены на трибометре в интервале температур от 23 до 300 °С при постоянной нагрузке $P = 1$ Н. Следует отметить, что дальнейшее увеличение нагрузки приводило к быстрому разрушению графитированных волокон. Один из жгутов совершал возвратно-поступательное движение с амплитудой 6 мм и частотой 1 Гц относительно другого неподвижного жгута, держатель которого крепился к чувствительному датчику трибометра, при помощи которого измерялись сила трения и нормальная нагрузка. Время выдержки волокон при $T = 300$ °С было равно 1 часу, а время единичного теста составляло 5 мин. В работе использовалось 3-х кратное повторение опытов, на основе которых по методу среднееквадратического отклонения вычислялись значения коэффициентов трения. Поверхность волокон перед испытаниями изучалась при помощи СЭМ микроскопии.

Результаты и их обсуждение

Анализ СЭМ изображений поверхности КВ (рис. 1a,b) и ГВ (рис. 1c,d) углеродных волокон позволяет сделать ряд выводов.

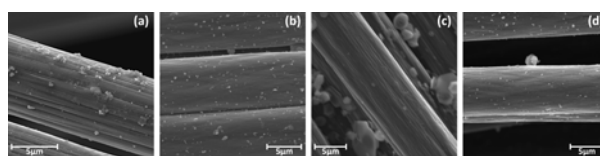


Рис. 1. Типичные СЭМ микрофотографии волокон

Рельеф поверхности КВ волокон имеет фибриллярную структуру, ориентированную в направлении продольной оси волокна. Шероховатость поверхности волокна Zoltek (рис. 1b) значительно меньше, чем шероховатость волокна УК (рис. 1a). Исследования микрорельефа поверхности ГВ волокна позволяют заключить – шероховатость поверхности после температурной обработки становится сглаженной (УК - рис. 1c и Zoltek – рис. 1d) в сравнении с исходной поверхностью КВ волокна (рис. 1a,b).

Анализ зависимостей коэффициента трения μ от температуры T (рис. 2) показывает, что при повышении температуры до 300 °С коэффициент трения значительно снижается.

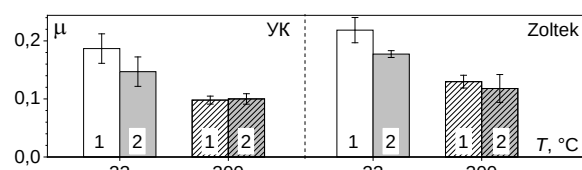


Рис. 2. Зависимость μ от T для КВ (1) и ГВ (2) волокон

При $T = 23$ °С трение на КВ волокнах выше, чем на окисленных при температуре 2800 °С ГВ волокнах. При этом трение на гладких КВ волокнах (Zoltek) выше, чем на шероховатых КВ волокнах (УК). Предположительно это связано с адгезионным механизмом трения для которого при малых нагрузках сила трения будет выше на той поверхности, чья шероховатость меньше. При достижении $T = 300$ °С коэффициент трения для КВ и ГВ волокон отличается незначительно.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-19-00548).

1. Буковский П.О., Морозов А.В., Кириченко А.Н. Влияние приработки на коэффициент трения углеродных композитных материалов авиационных тормозов // Трение и износ. 2020. Т. 41. № 4. С. 448—456.

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИРОВАНИЕМ В ПРОГРАММЕ QFORM СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ И УСЛОВИЙ ТРЕНИЯ В ПРОЦЕССАХ ГОРЯЧЕЙ ШТАМПОВКИ

А.А. Мышечкин, Я.О. Князев, С.В. Скрипник, А.Е. Уральский

Российский технологический университет РТУ МИРЭА, Москва, Россия; skripnik@mirea.ru

Методом компьютерного моделирования в программе QForm исследованы формоизменение, силовые и деформационные параметры, распределение температур по сечению поковки, условия трения в процессах горячей объемной штамповки. Дан анализ влияния различных смазок на фактор трения, изменение напряженно-деформированного состояния и температуры по объему поковки.

Горячая объемная штамповка является одним из основных технологических процессов производства поковок для разных отраслей промышленности с высокими эксплуатационными свойствами и минимальными допусками для последующей механической обработки. При использовании процессов горячей объемной формоизменения эффективность технологических процессов характеризуется такими показателями, как качество и точность поковок, коэффициент использования металла, сложность и стойкость применяемой оснастки, мощность требуемого оборудования (усилие пресса или масса падающих частей молота) и т.д. При этом важное значение для выбора оптимальных параметров технологического процесса имеет изучение влияния различных факторов на контактные силы трения.

В последнее время при разработке и исследовании технологических процессов горячей штамповки применяются методы компьютерного моделирования. В частности, для горячей объемной штамповки в последнее время широко используют программные комплексы QFORM, основанные на методе конечных элементов и позволяющие моделировать формоизменение металлов с учетом действия различных факторов [1,2,3]. Программа позволяет моделировать течение металлов, определить силовые параметры и напряженно-деформированное состояние металла, температуру по сечению поковки, предсказывать возможные дефекты (не заполнение штампа, складки, прострелы).

В данной работе компьютерным моделированием с использованием программного комплекса QFORM проведено изучение формоизменения, силовых параметров, напряженно-деформированного состояния, условий трения и распределения температур по сечению поковок и условий трения в процессах горячей штамповки поковок кольцо, клапан, диск и др.

Заготовка, переходы штамповки и готовая поковка «Клапан» представлены на рис.1. Диаметр головки $D=33,0$ мм, диаметр стержня – $d=7,8$ мм, длина клапана $L=115$ мм. Материал поковки – жаропрочная высоколегированная сталь 40X9C2. Согласно ГОСТ 5632-72 сталь 40X9C2

содержит 0,34-0,4% углерода, 8-10% хрома, 2-3% кремния, до 0,8% марганца и другие элементы.

На первом переходе штамповки приняты следующие условия. Угол конусности матрицы – 45° , высота головки – 16,5 мм, диаметр головки – 21 мм, зазор между пуансоном и матрицей – 0,05 мм, диаметр калибрующего участка матрицы – 7,87 мм (на втором переходе – 7,94 мм), диаметр матрицы после калибрующего участка – 8,1 мм. Общая высота поковки – 104,5 мм. В соответствии с законом постоянства объема заготовки до и после деформации был определен объем заготовки (8500 мм³) и на основе известных рекомендаций были выбраны размеры заготовки: $D_3 = 19$ мм, $H_3 = 30$ мм.

В соответствии с методикой моделирования [1] в графическом редакторе QDraft была подготовлена оснастка, введены исходные данные (температура металла и его механические характеристики, условия трения, материал и условия остановки инструмента, его температура, условия работы и др.). В качестве смазки выбрана смесь графита с водой. Температура нагрева металла перед штамповкой принята 1200 °C, температура подогрева инструмента – 200 °C.

Результаты моделирования процесса штамповки поковки «Клапан» на первом переходе представлены на рис.2.

Анализ полученных материалов показывает, что максимальная накопленная пластическая деформация в стержневой части поковки составляет 4,64. При этом деформация в приконтактных слоях (3,5-4,6) значительно выше деформации в центральной части стержня (2,5-3,0), что согласуется с картиной координатной сетки (трассировкой). Среднее напряжение по сечению поковки находится в пределах от +171,3 до -1556,9 МПа. При этом фактически растягивающие напряжения действуют только в поверхностном слое нижней части стержня, в остальной части поковки действуют только сжимающие напряжения, а наибольшие – в верхней части поковки (в головке). Поэтому при штамповке таких поковок из трудно-деформируемых материалов трещинообразование возможно только в концевой части стержня, что необходимо учитывать при выборе размеров заготовки и степени деформации на первом переходе и построении чертежа поковки

(назначением дополнительного припуска на стержневую часть поковки). Температура по

сечению поковки находится в пределах 1254-784 °С.

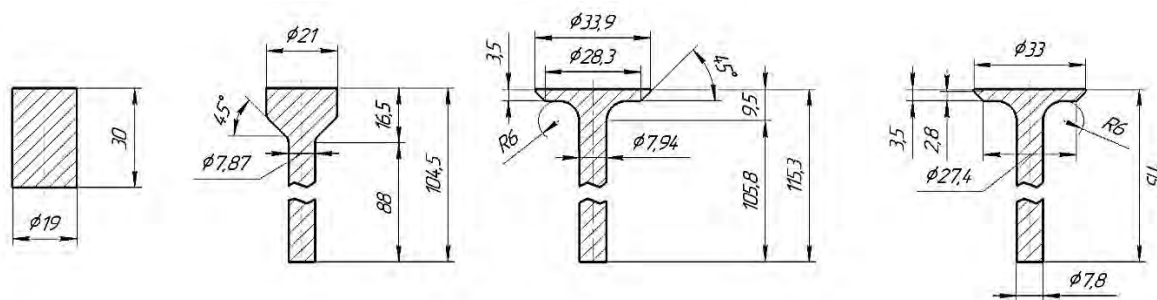


Рис.1. Заготовка, переходы штамповки и готовая (холодная) поковка

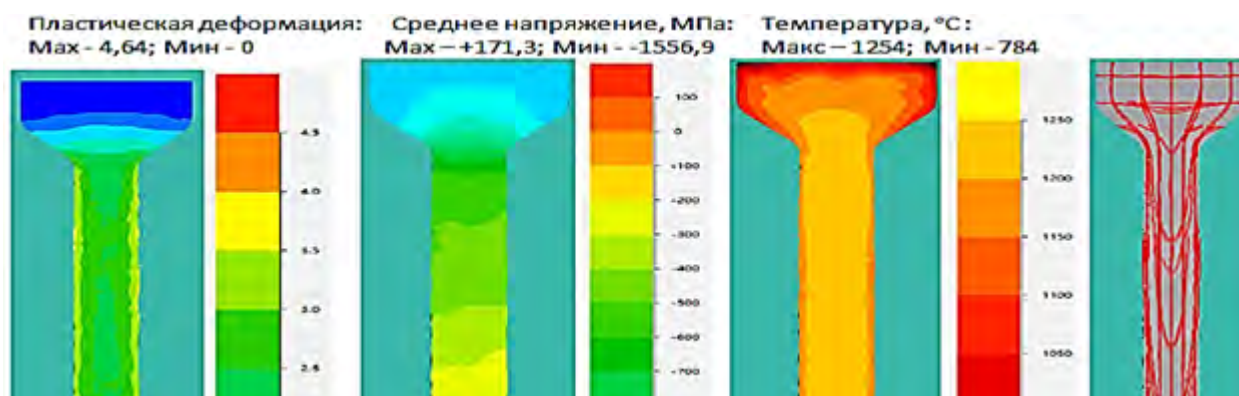


Рис.2. Результаты моделирования поковки «Клапан» на первом переходе

На втором переходе происходит доштамповка головки и окончательное оформление стержня поковки (рис. 1). Результаты

моделирования процесса штамповки поковки «Клапан» на втором переходе представлены на рис.3.

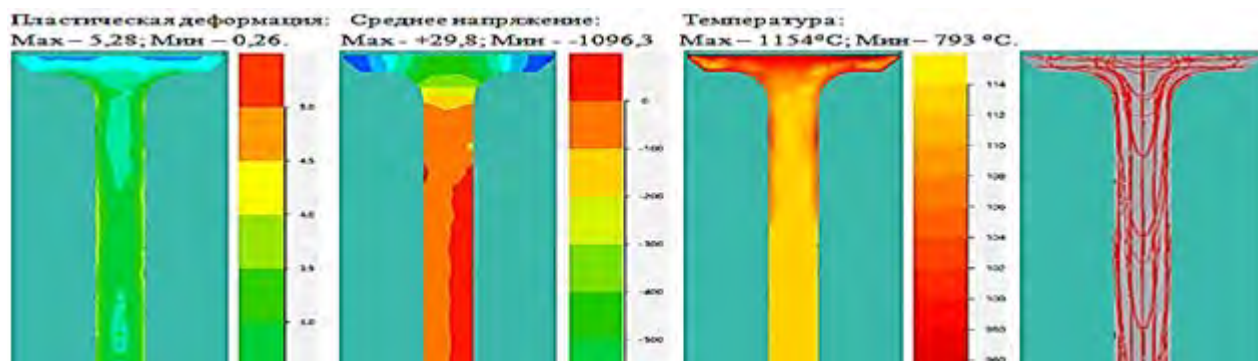


Рис.3. Результаты моделирования поковки «Клапан» на втором переходе

Анализ полученных материалов показывает, что максимальная накопленная пластическая деформация в стержневой части поковки составляет 5,28. При этом деформация в приконтактных слоях (2,5-3,5) значительно выше деформации в центральной части стержня (1,5-2,5), что согласуется с картиной координатной сетки (трассировкой). Накопленная деформация в головке поковки составляет 1,0-2,0.

Среднее напряжение по сечению поковки находится в пределах от +29,8 до -1096,3 МПа. При этом фактически растягивающие напряжения также,

как и на первом переходе, действуют только в поверхностном слое нижней части стержня, в остальной части поковки действуют только сжимающие напряжения, а наибольшие – в верхней части поковки (в головке).

Максимальное значение критерия Gartfield, характеризующее вероятность образования трещины, на втором переходе наблюдается в центральной части головки и равно 0,932. Это значение критерия показывает, что вероятность образования трещины незначительно. На первом переходе значение критерия Gartfield равно 0,341.

Температура по сечению поковки находится в пределах 1154-793 °С.

Результаты исследования влияния различных смазок на процесс горячей штамповки поковок представлены в табл.1.

Таблица 1. Результаты моделирования процессов горячей объемной штамповки поковок

Параметр	Условия деформации				
	Без трения	Стеклосмазка	Графит-вода	Солевого раствора	Без смазки
Поковка «Диск»					
Усилие осадки, МН	4,38	4,35	4,46	4,63	4,66
Усилие штамповки, МН	32,04	32,62	35,85	40,29	42,94
Максимальная температура, °С	1220	1220	1223	1224	1225
Минимальная температура, °С	816	972	882	845	831
Поковка «Клапан»					
Усилие предварительной штамповки, МН	0,173	0,192	0,234	0,626	0,712
Усилие окончательной штамповки, МН	0,619	0,659	0,843	2,4	2,13
Максимальная температура, °С	1144	1167	1159	1450	1419
Минимальная температура, °С	671	873	829	673	731
Поковка «Кольцо»					
Усилие осадки, МН	0,122	0,121	0,118	0,115	0,113
Усилие штамповки, МН	0,998	1,033	1,578	2,415	2,662
Максимальная температура, °С	1192	1206	1198	1191	1192
Минимальная температура, °С	707	904	835	808	810

Анализ полученных результатов показывает, что наибольшую эффективность имеют смазки на основе стекла (стеклосмазка) и графита (графит+вода). При использовании этих смазок при штамповке поковок «Диск», усилие на 5-18% ниже, чем при использовании солевого раствора и на 6-23% ниже в сравнении со штамповкой без смазки. При штамповке поковки «Клапан» при использовании этих смазок усилие ниже в 3 раза в сравнении с солевым раствором и в 3,2 раза в сравнении со штамповкой без смазки. Полученные результаты при штамповке поковки «Клапан» можно объяснить тем, что в этом случае вследствие возрастания удельных усилий повышается значение и роль сил трения в технологическом процессе. При осадке заготовки в процессе штамповки поковки «Кольцо» при использовании стеклосмазки и смазки на основе графита усилие осадки практически не отличается в сравнении с солевым раствором или деформации без смазки. Однако, при штамповке данной поковки при использовании смазок на основе графита и стеклосмазки усилие снижается в 1,5-2,5 раза.

Характер влияния изучаемых смазок на силовые параметры хорошо согласуется с изменением температуры по сечению поковок. При использовании стеклосмазки и смазки на основе графита температура по сечению поковки распределяется более равномерно и температурный перепад по сечению значительно ниже. Так, при использовании стеклосмазки и смазки на основе графита максимальная разность температур по сечению штампуемых поковок составляет 330-360° С, а при деформации без смазки или с солевым раствором для поковок диск и кольцо – 380-390° С. Для поковки «Клапан» в этом случае даже наблюдается резкий рост температуры до 1450° С, однако это требует уточнения и дополнительных экспериментальных исследований.

Проведенные экспериментальные исследования силовых параметров при штамповке поковки кольцо в основном подтвердили данные моделирования. Расхождение результатов находятся в пределах 15-28%.

1. Конечно-элементное моделирование технологических процессовковки и объемной штамповки: учебное пособие под ред. А.В. Власова /А.В.Власов, С.А.Стебунов, С.А.Евсюков, Н.В.Биба, А.А.Шитиков.-М.: изд-во МВТУ им. Н.Э.Баумана, 2019.-383с.

2.Мышечкин А.А., Морозов Ю.А. Моделирование процесса горячей объемной штамповки поковки «Фланец» моделированием в программе QForm// Инновационные технологии в электронике и приборостроении: Сборник докладов Российской научно-технической конференции с международным участием.-РТУ МИРЭА. М.,-2020, Т.2, с.153-159.

3. Мышечкин А.А., Морозов Ю.А., Юсупов В.С. Исследование и совершенствование процесса горячего формообразования поковки «Подшипник» моделированием в программе QForm// Инновационные технологии в электронике и приборостроении: Сборник докладов Российской научно-технической конференции с международным участием.-РТУ МИРЭА. М.,-2021, Т.2, с.153-159.

АНАЛИЗ ИЗНАШИВАНИЯ ПЕРЕМЕШИВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ШНЕКОВОГО РАСТВОРИТЕЛЯ В ГАЛУРГИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

А.С. Паличева, С.В. Карцев

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; palicheva_anna@mail.ru

Обобщены и проанализированы результаты исследований коррозионно-эрозионного изнашивания перемешивающих устройств шнековых растворителей в галургической промышленности. Показаны возникающие в процессе эксплуатации дефекты, приводящие к частой замене перемешивающих устройств, а также возможные пути увеличения ресурса перемешивающего устройства, требующие дальнейших исследований.

Цель

Проблема коррозионно-эрозионного изнашивания перемешивающих устройств шнековых растворителей остро стоит перед всеми предприятиями галургической промышленности. Срок службы перемешивающих устройств в большинстве случаев не превышает трех лет при стоимости более двадцати миллионов рублей.

Интенсивное коррозионно-эрозионное изнашивание связано с особенностями эксплуатации аппаратов.

Проблема коррозии оборудования, используемого в производстве калийных удобрений галургическим способом, существует с момента зарождения калийной промышленности. Так в 1927 году, в бюллетене, описывающем развитие калийной промышленности в Германии и Франции, Дж.С. Райс и Дж. Э. Дэвис приводят данные о необходимости замены оборудования для растворения руды каждые три года [5]. При этом потери от коррозии, выражающиеся в сроке амортизации оборудования, составляют до 1/3 стоимости конечного продукта.

В изданном в Российской Федерации в 1991 году справочнике по техническому обслуживанию и ремонту технологического оборудования предприятий по производству минеральных удобрений содержатся данные о необходимости проведения капитального ремонта через каждые 8640 часов работы оборудования [2]. При проведении капитального ремонта происходит замена базовых деталей оборудования, что в конечном итоге увеличивает стоимость калийных удобрений. Срок службы оборудования, установленный нормативными документами, составляет 10 лет.

Шнековые растворители с элеватором обезвоживающим применяются в галургической промышленности для выщелачивания хлористого калия из сильвинитовой руды. В процессе работы аппарата твердая фаза перемешивается с растворяющим щелоком для интенсификации процесса выщелачивания, а образующийся галитовый отвал транспортируется к элеватору, предназначенному для обезвоживания и выгрузки галитового отвала из аппарата.

Таким образом, наличие хлоридов, температуры в среднем около 100 °С, а также твердых частиц не растворенной руды $d \leq 5$ мм. интенсифицирует про-

цесс коррозионно-эрозионного изнашивания оборудования. Влияние среды на аустенитно-ферритную сталь марки: 08X21H6M2T, материал изготовления аппарата, а также механизм коррозионного изнашивания исследован ранее, а результаты опубликованы в работах [1,3,4].

Получение информации об остаточном ресурсе роторов шнекового растворителя связано в том числе с объективной оценкой находящихся в эксплуатации аппаратов, что не исключает существенные ошибки. Перемешивающие устройства выбраковываются и утилизируются при ремонте оборудования на основе субъективных мнений без опоры на методику прогнозирования остаточного ресурса по причине отсутствия последней.

При определении остаточной годности перемешивающие устройства могут находиться в различном техническом состоянии, поэтому методика определения остаточного ресурса должна иметь несколько вариантов. В связи с уникальной конструкцией исследуемого оборудования данная методика может быть разработана только на основе исследований и анализа причин отказов оборудования, находящегося в эксплуатации.

В свете изложенного были проведены наблюдения за процессами изменения технического состояния технологического оборудования по производству калийных удобрений галургическим способом с целью контроля фактического состояния и прогнозирования ресурса, возможности прогнозирования внезапных отказов и улучшения эксплуатационных параметров.

Материалы и методы

С целью определения состояния перемешивающих устройств шнековых растворителей с элеватором обезвоживающим на месте эксплуатации применялся метод визуального и измерительного контроля. Исследования проводились для оценки и выявления изменения формы деталей и узлов, поверхностных дефектов на металле и сварных швах, образовавшихся в процессе эксплуатации (трещин, деформации, коррозионно-эрозионных повреждений и проч.).

Для целей исследования применялись лупы с трехкратным увеличением, штангенциркуль ШЦ-1-125-0,25, наборы щупов, индикаторный толщиномер

и рулетка.

В месте замеров глубины коррозионно-эрозионных повреждений поверхность очищалась от влаги и продуктов коррозии, препятствующих проведению замеров.

Выявлялось наличие механических повреждений поверхности, изменение формы (коробление, провисание) и другие отклонения от чертежей. Металл осматривался на отсутствие трещин и иных поверхностных дефектов, образовавшихся в процессе эксплуатации, оценивался коррозионный и эрозионный износ путем замеров фактической толщины стенки металла, глубины коррозионных язв и размеров зон коррозионных повреждений, а также размеров деформируемых участков.

Результаты и их обсуждение

Исследования состояния перемешивающих устройств шнековых растворителей с элеватором обезвоживающим на месте эксплуатации проводились с 2012 года на предприятиях галургической промышленности в Российской Федерации и Республике Беларусь во время остановов технологических линий со средней периодичностью шесть месяцев. Расположение одной секции перемешивающего устройства в корпусе аппарата приведено на рис.1. Были обследованы перемешивающие устройства с различным сроком эксплуатации: от шести месяцев до трех лет.



Рис. 1. Расположение перемешивающего устройства в корпусе аппарата на месте эксплуатации

В каждой технологической линии производства калийных удобрений галургическим методом имеется три шнековых растворителя с элеватором обезвоживающим, конструкция которых аналогична и имеет незначительные различия в расположении штуцеров, перегородок и переливных карманов. В корпусе корытообразной формы расположен основной рабочий орган аппарата – горизонтальный ротор, который представляет собой вертикальное перемешивающее устройство. Для удобства монтажа ротор выполняется состоящим из нескольких частей, которые соединяются между собой при помощи фланцевых разъемов.

Ротор служит не только для перемешивания силивинита, но и обеспечивает длительный контакт между выщелачиваемым материалом и растворяю-

щим щелоком, а также для транспортировки твердой фазы в карман элеватора.

Характер основных дефектов, образующихся в процессе эксплуатации, аналогичен. После начала эксплуатации, в первые полгода, образуются дефекты, что обусловлено механизмом питтинговой коррозии стали марки: 08Х21Н6М2Т, а также коррозионно-механическим изнашиванием кромок в результате контакта с нерастворенной рудой [3].

Расположение дефектов на поверхности перемешивающего устройства также имеет ряд закономерностей. Основные зоны ротора, подверженные коррозионно-эрозионному изнашиванию показаны на рис.2.

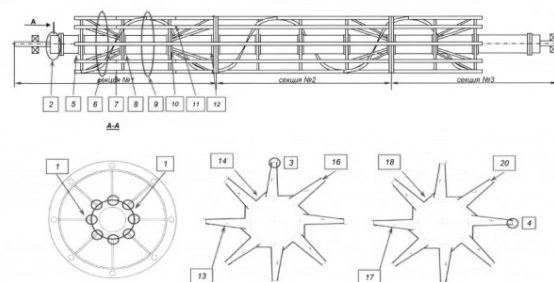


Рис. 2. Основные зоны ротора, подверженные коррозионно-эрозионному изнашиванию

Равномерная коррозия с небольшой глубиной проникновения (от 0.5 мм до 1 мм) наблюдается на цапфах со стороны привода. При этом коррозионные повреждения не развиваются столь интенсивно как на иных участках перемешивающего устройства.

Коррозионные язвы располагаются в основном в зоне сварных швов, термического влияния и гибки металла неравномерно по всему перемешивающему устройству. В процессе эксплуатации глубина коррозионных язв увеличивается вплоть до сквозных отверстий, в сварных швах могут развиваться трещины (рис 3.). Глубина коррозионного износа в ряде случаев увеличивается со скоростью 0.58 миллиметров в месяц.

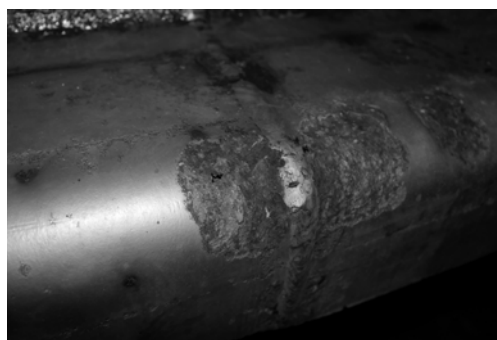


Рис. 3. Коррозионная язва на лопасти перемешивающего устройства в зоне сварного шва

Коррозионно-эрозионному изнашиванию под-

вержены кромки лопастей и каркасов перемешивающего устройства. Данной области изнашивание происходит интенсивно и через шесть месяцев эксплуатации может достигать значений до 5 мм. Повреждения кромки носят рваный характер и расположены равномерно по всему ротору. Визуально характер повреждений показан на рис. 4.



Рис.4. Коррозионно-эрозионное изнашивание кромки лопасти перемешивающего устройства

Резкое увеличение скорости износа в отдельные моменты обусловлено случайными неблагоприятными эксплуатационными условиями и факторами: большие нагрузки, изменение фракционного состава твердой или жидкой фаз и др. С другой стороны, периодам малой скорости изменения износа соответствуют случайные благоприятные условия работы.

В процессе исследований выявлены деформации кромок лопасти перемешивающего устройства, вызванные попаданием в аппарат посторонних предметов, а также твердых соляных отложений, образующихся на штуцере загрузки твердой фазы, расположенного на крышке аппарата. Размер подобных отложений, попадающих в аппарат в процессе эксплуатации, может достигать 50 см. (рис.5), что приводит к серьезным деформациям перемешивающего устройства и аварийному останову аппаратов.



Рис.5. Соляное отложение, деформировавшее ротор и вызвавшее аварийную остановку аппарата

Анализ изнашивания перемешивающего устройства шнековых растворителей с элеватором, обезвреживающим показывает, что оборудование работает в условиях интенсивного абразивного износа.

С целью определения остаточного ресурса работы перемешивающих устройств шнековых растворителей необходима разработка модели на базе современного программного обеспечения, позволяющей проводить анализ нагрузок на деформированные и подверженные интенсивному износу области с учетом данных проводимых натурных исследований аппаратов.

Нанесение полимерных антикоррозионных покрытий не дало положительных результатов по увеличению срока службы перемешивающего устройства из-за высокой абразивной среды и возможных ударов в результате падения солевых отложений с крышки аппарата.

Данный пример показывает необходимость системного анализа конструкции перемешивающего устройства для выбора наиболее надежного конструктивно-компоновочного решения и требует новых направлений исследований, связанных с проверкой различных способов упрочнения лопастей роторов (наклепом, нанесением на рабочие поверхности слоя металлов большей твердости и слабо поддающихся окислению и проч.), повышением чистоты поверхности, устранением остаточных напряжений, изменением радиусагиба лопастей, исключение возможности образования солевых отложений путем обеспечения промывки или пропарки областей их возможного образования.

Контроль фактического технического состояния, прогнозирование вероятных отказов и внесение конструктивных улучшений позволят уменьшить количество внезапных отказов, простоев по причине технической неисправности, улучшить эксплуатационные параметры и повысить экономичность аппаратов по производству калийных удобрений галургическим способом.

1. Карцев С.В., Кравченко И.Н., Ерофеев М.Н. Методика оценки технического состояния машин и технологического оборудования для специального строительства / Монография. – Балашиха: ВТУ МО РФ, 2008. – 98 с.
2. Киселев Г.Ф., Колпачков В.И., Яшура А.И. Система технического обслуживания и ремонта технологического оборудования предприятий по производству минеральных удобрений. М: Химия. 1991. 384 с.
3. Таранцева, К. Р. Исследование коррозионной стойкости оборудования в производстве калийных удобрений галургическим способом / К. Р. Таранцева, О. В. Фирсова // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2015. – № 1. – С. 34-36.
4. Щербakov А.И., Касаткина И.В., Паличева А.С. и др. Питтинговая коррозия аустенитно-ферритной стали 08X21H6M2T в нейтральной хлоридной среде при производстве калийных удобрений // Коррозия: материалы и защита. 2017. № 9. С. 31-36.
5. Rice G.S., Davis J.A. Potash Mining in Germany and France, U.S. Department of Commerce, Bureau of Mines, Bulletin 274. Washington, 1927. 100 p.

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ ПО ОСТАТОЧНОМУ ПОЛОТНУ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ВАФЕЛЬНЫХ ОБОЛОЧЕК ЗЕРКАЛЬНЫМ ФРЕЗЕРОВАНИЕМ

О.В. Пась¹, Н.А. Серков²

¹ ФГУП «НПО «Техномаш» им. С.А. Афанасьева, Москва, Россия; o.pa@inbox.ru

² Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; serkov1943@mail.ru

Рассмотрена технология зеркального фрезерования вафельного фона, факторы, приводящие к отклонениям по толщине остаточного полотна обечайки, различные методы повышения точности обработки по остаточному полотну, приведено описание системы комбинированной программной коррекции с самонастройкой

Введение. Технология зеркального фрезерования вафельных оболочек.

Оболочки с вафельным фоном широко применяются в конструкциях ДСЕ летательных аппаратов. Вафельный фон представляет собой сетку пересекающихся ребер, полученных фрезерованием рядов карманов в заготовках из алюминиевых сплавов. Вафельные оболочки представлены цилиндрическими и коническими обечайками, а также днищами сферической и трохоидальной формы. Применение вафельных оболочек обеспечивает максимальные прочностные характеристики при минимальной массе конструкции, а также дает ряд других преимуществ по сравнению с гладкими обечайками, усиленными шпаянгоутно-стрингерным набором [1].

Основным методом изготовления вафельных оболочек является сворачивание плоских панелей в полуобечайки с последующей электронно-лучевой сваркой и механической обработкой карманов в обечайке. Большие размеры и тонкостенность обечаек с вафельным фоном приводят к деформациям исходной заготовки, что делает затруднительным фрезерование вафельного фона на универсальном технологическом оборудовании и требует применения специального технологического оборудования - программно-копировальных станков «СВО». Данные станки выполняют копирование задней стенки заготовки при движении формообразующих узлов по управляющей программе.

В настоящий момент была реализована т.н. технология «зеркального» фрезерования, при которой копиром служит электромеханическая система со встроенным датчиком слежения за контуром задней стенки заготовки (рис.1).

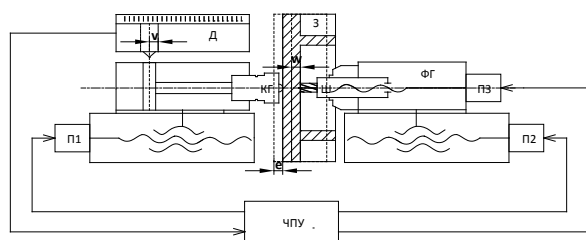


Рис. 1. Схема осуществления зеркального фрезерования

В данном случае приводы П1 и П2 осуществляют

синхронное движение по управляющей программе. Датчик Д, встроенный в копирующую головку К, отслеживает перемещение штока пневмоцилиндра, сигнал с датчика поступает в систему ЧПУ, которая корректирует положение фрезерной головки ФГ со шпинделем Ш, задавая корректирующее воздействие в привод осевого перемещения фрезерной головки ПЗ в зависимости от отклонения e внутренней поверхности заготовки З с противоположной стороны.

Применение такой схемы обработки вафельного фона обеспечивает компенсацию погрешностей формы заготовки и увеличивает виброустойчивость системы СПИД. Тем не менее, действие ряда факторов, которые далее будут рассмотрены подробнее, приводит к отклонениям по толщине остаточного полотна и ширине продольных и кольцевых ребер карманов. Что, в свою очередь, приводит к увеличению дополнительных масс, назначаемых исходя из припусков на мех. обработку, а также к необходимости выполнения доводочных операций, с применением энергозатратных и трудоемких электрофизических методов обработки [2]. Поэтому развитие методов повышения точности обработки остаточного полотна и ребер карманов представляется актуальным направлением исследований, т.к. позволит в перспективе уменьшить долю дополнительных масс изделия, а также повысить производительность технологии изготовления обечайки за счет уменьшения числа доводочных операций, обеспечит сокращения числа возможных дефектов при фрезеровании.

Отметим, что основную долю дополнительных масс составляют припуски по толщине полотна, поэтому далее ограничимся исследованием только тех подходов, которые направлены на повышение точности обработки дна кармана, исключив из рассмотрения вопросы повышения точности обработки по ширине продольных и кольцевых ребер.

Анализ методов повышения точности обработки по толщине остаточного полотна.

Различают следующие основные направления повышения точности механической обработки на металлорежущих станках с ЧПУ [4]:

- 1) совершенствование конструкции несущей системы и системы ЧПУ станка и технологии его изготовления;

2) совершенствование процесса управления станком методами коррекции:

- коррекция на основе априорной информации (коррекция по результатам калибровки станка, предсказание УП);
- коррекция на основе принципа обратной связи;
- коррекция на основе принципа компенсации возмущений.

Принимая во внимание специфику технологии зеркального фрезерования, можно отметить, что дальнейшее совершенствование конструкции станка с целью повышения точности позиционирования будет оказывать ограниченный эффект на точность обработки остаточного полотна кармана. В то же самое время в конструкции станков СВО последних модификаций применяется ряд измерительных систем, автоматизирующих контрольно-измерительные операции: система ультразвукового контроля толщины остаточного полотна, система слежения за контуром задней стенки заготовки, системы измерения инструмента, система измерения детали и т.д. Данный факт наряду с широкими возможностями современных СЧПУ по агрегации, протоколированию и обмену данными между различными информационными системами, обуславливает применение методов программной коррекции в качестве основного подхода при решении задачи повышения точности обработки по остаточному полотну.

Разработка метода коррекции.

При зеркальном фрезеровании вафельного фона разброс толщин остаточного полотна определяется совокупным действием двух групп факторов (рис.2). Факторы 1-ой группы приводят к образованию различных по величине ошибок в зависимости от положения режущего инструмента внутри одного кармана. При этом действие данных факторов можно рассматривать как квазипостоянное, для близко расположенных ячеек с одной и той же траекторией обработки будут получаться одинаковые картины отклонений.

В свою очередь факторы 2-ой группы определяют

разброс толщин в зависимости от положения (порядкового номера) ячейки в рабочем пространстве станка и не оказывают существенного влияния на разнотолщинность внутри одной ячейки. Такая классификация факторов является основой для выбора и разработки метода комбинированной программной коррекции с самонастройкой [3].

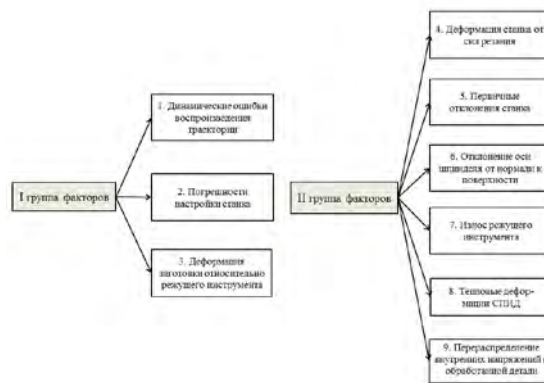


Рис. 2. Факторы, приводящие к отклонениям

В [5] был представлен алгоритм коррекции и результаты отработки корректирующего воздействия при осуществлении коррекции от прохода к проходу. Система УЗК используется для измерения выходной величины - толщины остаточного полотна T . Данные обмера остаточного полотна в виде карты толщин $[B_i, Z_i, T_i]$ передаются в модуль самонастройки после обработки каждой i -ой ячейки.

На их основе генерируется сигнал коррекции для данной и последующих ячеек как разность между заданной толщиной ост. полотна T_{ref} и фактически полученной толщиной T_{act} на предыдущем проходе $K = T_{act} - T_{ref}$

Таким образом, реализуя принцип коррекции по обратной связи, удастся компенсировать влияние факторов 1-ой группы на разброс толщин в пределах одной ячейки, а также части факторов 2-ой группы для данной и последующих ячеек. Кроме того, зная

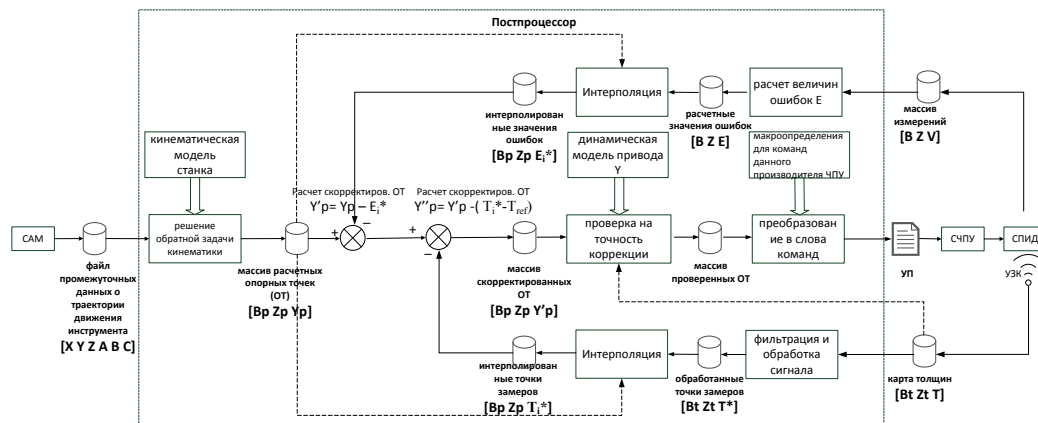


Рис. 3. Комбинированная система коррекция с самонастройкой

схему влияния факторов 2-ой группы на ошибку по толщине остаточного полотна, можно на основе данных, полученных с других измерительных систем (энкодеры приводов подач, сигнал с датчика измерения за контуром V, показания системы измерения инструмента и т.д.) реализовать коррекцию по возмущению K_i^d для каждой ячейки. Таким образом, формула для расчета суммарной коррекции K для 1-ой и последующих ячеек примет вид:

$$K_l(B, Z) = T_{act}^l(B, Z) - T_{ref}^l(B, Z) \quad (1)$$

$$K_i(B, Z) = K_l(B, Z) + K_i^d \quad (2)$$

Здесь: T_{act}^l - измеренная толщина остаточного полотна на предыдущем(получистовом) проходе 1-ой ячейки, T_{ref}^l - заданная толщина остаточного полотна, K_i^d - сигнал коррекции по возмущению.

В качестве примера, для расчета коррекции по возмущению K_i^d можно использовать зависимость ошибки по толщине остаточного полотна от отклонения оси шпинделя от нормали к поверхности (рис.4):

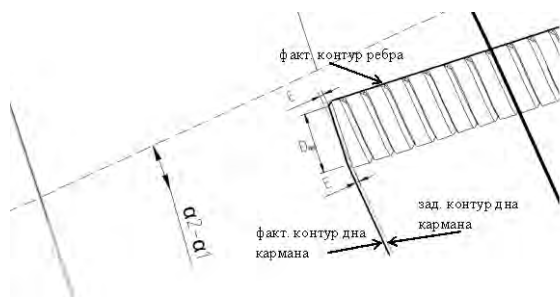


Рис. 4. Схема влияния отклонения оси шпинделя от нормали на возникающую ошибку по толщине

Соответствующее значение ошибки для данной ячейки будет определяться формулой:

$$E = |R_{фр} * \sin(\alpha_2 - \alpha_1)| \quad (3)$$

где $R_{фр}$ - радиус фрезы, α_2 - угол наклона нормали к реальному контуру заготовки, $\alpha_1 = B$ - угол наклона нормали к запрограммированному контуру заготовки;

Угол наклона нормали α_2 к реальному контуру заготовки может быть рассчитан по величине угла наклона прямой, аппроксимирующей сигнал с датчика слежения за контуром $V(B)$ по методу наименьших квадратов:

$$\alpha_2 = \arctan \left[\frac{n * \sum_{i=1}^n B_i V_i - \sum_{i=1}^n B_i * \sum_{i=1}^n V_i}{n * \sum_{i=1}^n B_i^2 - \sum_{i=1}^n B_i * \sum_{i=1}^n B_i} \right] \quad (4)$$

где V_i - показание датчика слежения за контуром в i -ой точке, B_i - показание энкодера поворотного стола в i -ой точке, n - количество точек аппроксимирующей прямой.

На рис.5 приведены кривые ошибок по толщине ост. полотна: черная кривая – усредненные значения измеренных ошибок, серая кривая – рассчитанные

по формуле (3) значения.

Как можно увидеть из рис.5, расчетные отклонения демонстрируют хорошую корреляцию со значениями фактически полученных отклонений после обработки пояса карманов, что делает возможным использование формул (3), (4) для расчета коррекции по возмущению K_i^d для каждой ячейки.

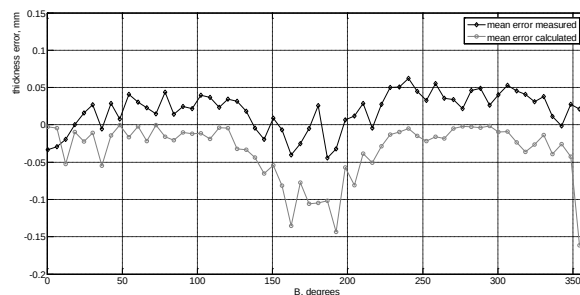


Рис. 5. Сравнение расчетных ошибок из-за отклонения оси шпинделя от нормали с измеренными усредненными значениями

Выводы.

- рассмотрена технология механической обработки вафельного фона с использованием программно-копировальной стратегии обработки;
- выполнен анализ методов повышения точности обработки по толщине остаточного полотна;
- предложен метод повышения точности чистового фрезерования путем использования комбинированного метода программной коррекции.

1. Ворожейкин В., Литвинчук А. Сквозная технология изготовления несущих корпусов изделий ракетно-космической техники // Решетневские чтения : материалы XXI Международ. науч. конф. (8–11 ноября 2017, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2017. С. 481–482.
2. Батрутдинов Р., Сысоев С. Технология изготовления вафельного фона в обечайках летательных аппаратов // Актуальные проблемы авиации и космонавтики, 2011. №7, С. 7-8.
3. Pas O., Serkov N. Developing an algorithm to control the accuracy of the milling of aerospace parts with cellular structure by using copying machine- tools with CNC of "SVO" type // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2019, vol. 489, p.351-355.
4. Серков Н. А. Точность многокоординатных машин с ЧПУ: Теоретические и экспериментальные основы. - М.: ЛЕНАНД, 2015. - 304 с.
5. Пась О.В., Серков Н.А. Повышение точности обработки остаточного полотна вафельных оболочек методом самонастройки от прохода к проходу. В сборнике: XXXII Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения. Сборник трудов конференции. 2021. С. 498-502.

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИСПЫТАНИЙ УМЗ ТИТАНА В УСЛОВИЯХ ФРЕТТИНГ ИЗНОСА

М.А. Пахомов, А.В. Михеев, М.А. Тананов, А.Ю. Албагачиев, В.В. Столяров

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; pakhomovmish@gmail.com

В данной работе представлены первые результаты по фреттинг-износу на УМЗ титана Grade-4 с разной амплитудой перемещения. Показаны трибологические особенности фреттинг-износа при возвратно-поступательном движении без смазки, с сохранением зависимости амплитуды перемещения от размера зоны контакта, чтобы трение происходило без выноса продуктов износа.

Цель

Современные представления о фреттинг износе связаны с необычными условиями испытаний при этом виде трения. Как правило, процесс трения осуществляется при циклическом микроперемещении контактирующих поверхностей качением/скольжением без смазки, при низких частотах (менее 50 Гц) и очень малых амплитудах (20-200 нм) [1]. Предполагается, что эти граничные условия гарантируют сохранение продуктов износа в зоне контакта «рис. 1» [2].



Рис. 1. Различные ситуации при скольжении шарика по плоскости

Во многих случаях это приводит к катастрофическому износу и даже разрушению за короткое время. Лабораторное воспроизведение таких условий зачастую затруднительно, что связано с отсутствием либо подобных трибометров, либо методов контроля амплитуды в нанометровом диапазоне. Трение и износ являются структурно зависимыми свойствами и поэтому исследование особенностей фреттинг-износа в наноструктурных материалах, в которых размер зерен соизмерим с амплитудой перемещения становится особенно важным. Цель исследования – оценить возможность физического моделирования фреттинг износа в условиях далеких от указанных выше для наноструктурного титана.

Материалы и методы

Исходным материалом служил прутки диаметром 20 мм технически чистого титана Grade 4 в ультрамелкозернистом (УМЗ) состоянии (размер зерен $d_z = 450$ нм), полученном методом равноканального углового прессования «рис. 2». Микротвердость УМЗ титана составляла $H_v = 400$. Из

прутка вдоль продольной оси были вырезаны две пластины размером $2 \times 6 \times 43$ мм³. Перед испытанием образцы шлифовались до $Ra \leq 1$ мкм.

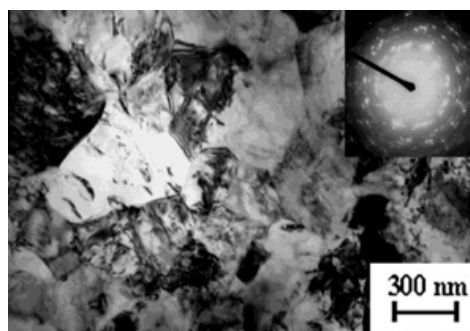


Рис. 2. Микроструктура УМЗ титана Grade 4

Измерение устойчивости к фреттинг-износу проводилось по схеме шаровой индентор по пластине. К индентору прикладываются возвратно-поступательные колебания и нормальная нагрузка. Указанная схема испытаний реализуется при помощи специального стенда, конструкция которого показана на «рис. 3».

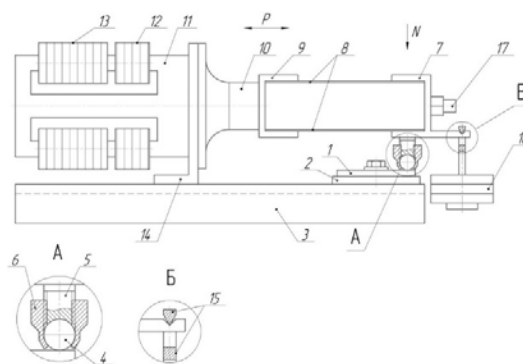


Рис. 3. Конструкция стенда

Образец 1 в форме пластины, закреплён на общем основании 3 при помощи прижимов 2. На одном образце возможно провести несколько испытаний путём перестановки его в прижимах. Индентор 4, выполненный в виде сферы, установлен в держатель 5 и зажат резьбовой втулкой 6. Благодаря применённой форме индентора возможная

неперпендикулярность его оси к плоскости образца не сказывается на результатах.

Источником механических колебаний является магнитоэлектрический преобразователь, основой которого является магнитопровод 11 из железоникелевого сплава с двумя обмотками: рабочей 13 и подмагничивающей 12. Рабочая обмотка магнитоэлектрического преобразователя подключена к генератору синусоидальных колебаний с регулируемой амплитудой и частотой. Обмотка подмагничивания создаёт постоянную составляющую магнитного поля для повышения линейности характеристики преобразователя. Магнитопровод закреплён на основании при помощи кронштейна 14. Колебания передаются на механическую систему стенда через стержневой концентратор 10, который представляет собой стержень переменного сечения и служит для увеличения амплитуды колебаний.

Механическая система стенда включает пружинный параллелограмм, образованный плоскими пружинами 8 и кронштейнами 7 и 9 и устройства нагружения, состоящего из наборных грузов 16, устанавливаемых на подвес 15, который опирается на призматический выступ на кронштейн 7. Такая конструкция снижает влияние нормальной нагрузки на параметры колебаний.

Виброускорение колебаний измеряется акселерометром 17. По известной форме и частоте сигнала генератора и виброускорению можно вычислить амплитуду перемещений. Сигнал акселерометра поступает на осциллограф-анализатор спектра, который измеряет амплитуду и определяет наличие паразитных гармоник. Частота генератора подстраивается до минимума гармоник для обеспечения прямолинейности колебаний.

Степень износа образца после проведения испытаний определяется измерением размеров области износа, которая имеет вид прямоугольника. Длина и ширина измеряются инструментальным микроскопом. Глубина определяется при помощи профилометра.

Эксперимент выполнялся при амплитудах 5, 20, и 60 мкм, без смазки. Материал индентора – сталь ШХ15 в форме шара с диаметром 12,7 мм, его твёрдость 65 HRC. Частота колебаний составила 7900 Гц, с нагрузкой 60 Н, время испытания 30 мин.

Результаты

Размеры следов износа на образце и инденторе, измеренные после проведения испытаний приведены в «табл. 1».

Из таблицы видно, что зависимость между амплитудой и величиной износа не линейна. При расчёте диаметра отпечатка индентора при нагрузке 60 Н, получается 0,13 мм, размер всех полученных пятен контакта меньше.

Таблица 1. Размеры амплитуды и следов фреттинг-износа

Амплитуда, мкм	На ОБРАЗЦЕ, мкм			На ИНДЕНТОРЕ, мкм	
	Длина	Ширина	Глубина	Длина	Ширина
5	30	25	0,5	30	20
20	60	40	1	40	20
60	120	60	3	150	40

На рисунках ниже представлены следы фреттинг-износа на образце (рис. 4) и инденторе (рис. 5) с амплитудами: 5; 20; и 60 микрон.

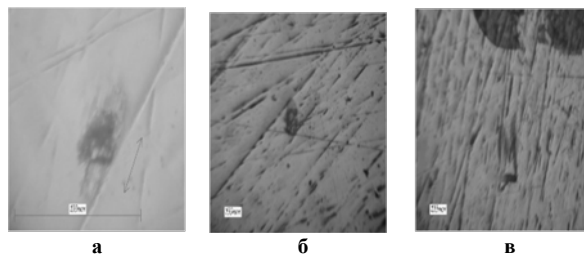


Рис. 4. Следы фреттинг-износа на образце, с амплитудами: а – 5 мкм; б – 20 мкм; в – 60 мкм

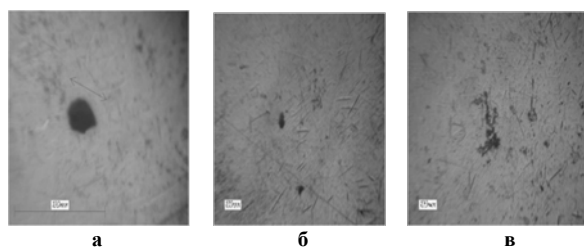


Рис. 5. Следы фреттинг-износа на инденторе, с амплитудами: а – 5 мкм; б – 20 мкм; в – 60 мкм

Модернизация существующей машины трения и условий испытания позволила регулировать амплитуду перемещения так, чтобы она была меньше размеров зоны контакта, а трение происходило без выноса продуктов износа, что характерно для фреттинг-износа.

1. Уотерхауз Р.Б. Фреттинг-коррозия. Л.: Машиностроение. 1976. 270 с.
2. Столяров В.В., Кузнецов В.П. Феноменология и структурные аспекты фреттинг-трения конструкционных материалов, гл.2 в коллективной монографии «Актуальные проблемы прочности», под ред. В.В. Рубаника. – Молодёжно: ОАО «Типография «Победа». 2020. 453 с.

МОДЕЛЬНЫЙ ТРИБОАНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ВЫСОКООБОРОТНЫХ УПОРНЫХ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ.

М.Н. Песковацков¹, И.С. Сплавский², Н.А. Воронин²

¹ООО «Эталон-Центр», Радужный, Россия

²Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; spl-igor@yandex.ru

Работа посвящена модельным трибологическим испытаниям и анализу полученных результатов исследования новых материалов, компактных и в виде покрытий, а также при наличии на них регулярного рельефа (текстуры) с целью ранжирования их и рекомендации по применению в упорных гидродинамических узлах трения, работающих при высоких скоростях и нагрузках.

При эксплуатации в экстремальных условиях работоспособность новой техники обеспечивается конструктивными особенностями поверхностей трения и применением новых перспективных материалов. Условия работы, которые можно отнести к экстремальным, возникают в крупногабаритных узлах трения, работающие при высоких скоростях скольжения и нагрузках. Трибологические исследования таких узлов трения, как правило, проводятся на модельных образцах [1].

Высокооборотные упорные подшипники скольжения достаточно широко применяются в различных узлах трения машиностроительной продукции. Перспективными материалами для работы в таких узлах трения являются металлические, керамические и металлокерамические материалы в компактном виде и в виде покрытий. Для снижения трения дополнительно поверхности трения часто покрываются антифрикционными материалами. Для эффективного создания условий существования в зазоре между контактируемыми поверхностями узла трения гидродинамического клина применяются различные решения конструктивного и технологического характера. Используют разделение поверхности трения на отдельные сегменты с различными механизмами их крепления, создают отдельные «карманы» и углубления на поверхности. Перспективно применение текстуры в виде спиральных канавок или в виде набора локальных углублений [2,3].

Цель работы – провести трибологические модельные испытания перспективных антифрикционных материалов с различным набором регулярного рельефа на одной из поверхностей трения для оценки их способности эффективно работать в условиях высоких скоростей в среде масла и выдать рекомендации по применению материалов и конструкций поверхностей трения в упорных подшипниках главных циркуляционных насосов атомных электростанций (ГЦН АЭС).

Материалы и оборудование.

В качестве исследовательских образцов были использованы экспериментальные образцы подпятников упорных подшипников различного конструктивного исполнения (Рис.1).

Материалы и конструктивные особенности экспериментальных образцов подпятников упорных подшипников представлены в таблице 1.

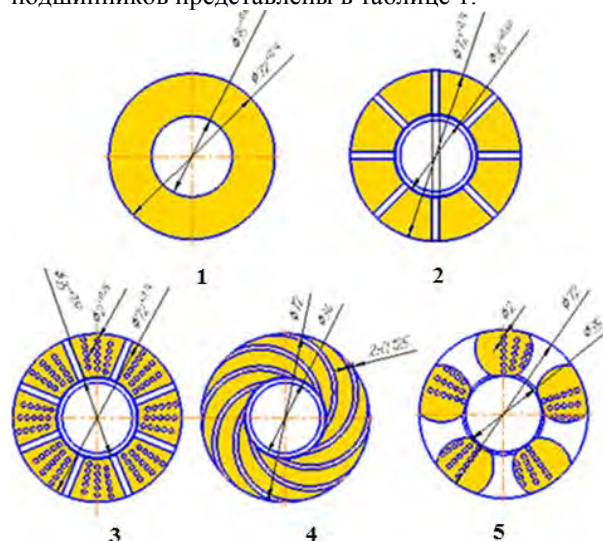


Рис. 1. Виды исполнения экспериментальных образцов подпятников упорных подшипников: 1- пята, 2-5 – подпятник

Таблица 1. Материалы экспериментальных образцов

№ трибопары	материал	
	Пята(1)	Подпятник (2,3,4,5)
№ 1 (1-2)	SiSiC	ВК8
№ 2 (1-5)	95X18	покрытие WC-10Co-4Cr, пропитанное бронзой (без текстуры)*
№ 3 (1-3)	95X18	покрытие WC-10Co-4Cr, пропитанное бронзой с текстурой в виде сетки углублений
№ 4 (1-4)	SiSiC	SiSiC с текстурой в виде спиральных канавок
№ 5 (1-5)	95X18	покрытие WC-10Co-4Cr, пропитанное бронзой с текстурой в виде сетки углублений на 30% площади колодки*

*- сегментный подпятник с качающимися колодками

Испытания были проведены на экспериментальном стенде МИС-01 (ООО «Эталон-Центр»), предназначенном для испытаний осевых опор гидрозащиты высокооборотных лопастных насосов (рис. 2).

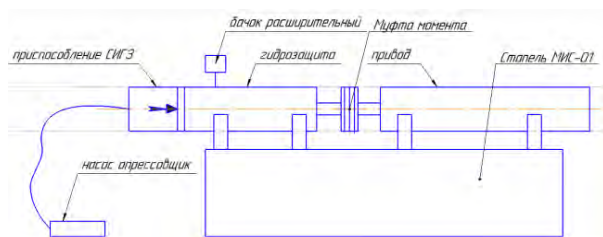


Рис. 2. Принципиальная схема испытаний

Методика исследования.

Основываясь на конструкторской документации, содержащей размеры и условия работы упорных подшипников главных циркуляционных насосов ВВЭР 1000 была разработана методика исследовательских испытаний модельных образцов упорных подшипников. В основе методики лежит применение условий нагружения экспериментальных образцов режимами, рассчитываемыми из условия равенства грузоподъемности модельного трибосопряжения грузоподъемности упорного подшипника ГЦН ВВЭР 1000, определяемому по произведению pV .

Эксплуатация упорного подшипника ГЦН осуществляется при контактном давлении - 5МПа и скорости скольжения - 30 м/с. Рабочая среда - масло турбинное Тп22. Нормированное значение коэффициент трения при запуске насоса не должна превышать 0,15, при работе в режиме гидродинамического трения - не превышать значение 0,1

Модельные режимы трения проводились при изменении числа оборотов в диапазоне 0–10 000 об/мин, и нагрузке в диапазоне 0,1 до 20 кН. Измерялись следующие показатели при испытаниях, коэффициент трения и температура масла в камере с экспериментальными образцами. Регулируемыми параметрами была скорость скольжения (число оборотов привода) и осевая нагрузка.

Результаты и обсуждение.

На рис.3 представлен график изменения коэффициента трения, температуры и параметра pV при испытании трибопары экспериментальных образцов № 1 (см. табл.1). Аналогичные графики были получены для всех исследуемых в работе трибосопряжений. Анализ фрикционности всех испытаний производился по графикам, представленным на рис. 4 и 5.

На рис.4 представлены кривые зависимости коэффициента трения от частоты вращения трибосопряжений всех исследуемых модельных трибосопряжений. Анализ полученных результатов показывает, что трибосопряжение № 5 с сегментными подпятниками и текстурой на поверхности трения показали высокие триботехнические свойства. Трибосопряжение № 5 показало значения коэффициента трения в режиме гидродинамической смазки значительно меньше регламентированных (см. значения кривых в область I). При частоте вращения 7000 об/мин коэффициент трения был в три раз

меньше регламентированного значения для текстурированных поверхностей (см. область I на рис.4). Текстура на сегментах подпятника трибосопряжения № 5 представляла собой сетку углублений круглого вида в плане, глубиной около 1 мм, занимала на поверхности трения каждого сегмента ~30% и располагалась в начальной части сегмента по направлению движения сегмента при вращения.

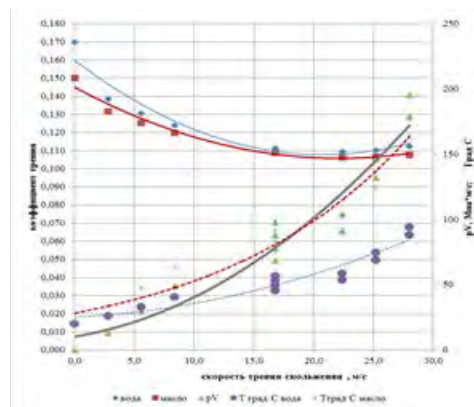


Рис. 3. Трибограмма пары SiSiC по ВК8 в разных средах

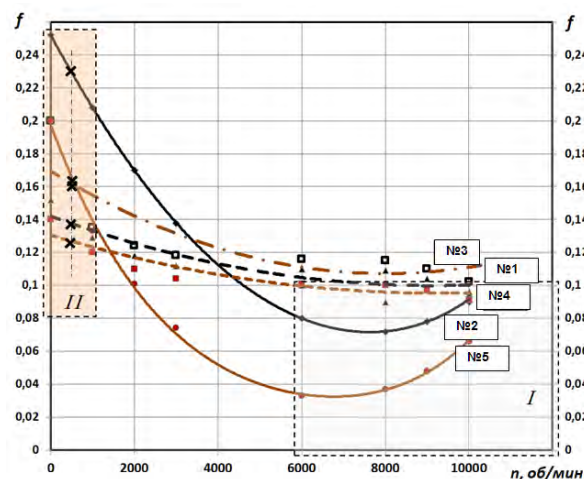


Рис. 4. Зависимость коэффициента трения от числа оборотов привода

Сегментированные поверхности на компактных подпятниках трибосопряжений № 3 и № 4 показали менее хорошие триботехнические свойства. Трибосопряжение № 3 по значению коэффициента трения несколько превысила величину, по сравнению с регламентированным значением. Во всей области гидродинамического трения отмечено значение коэффициента трения в диапазоне от 0,11 до 0,12. Текстура на подпятнике трибосопряжения № 3 также содержала сетку углублений круглого вида в плане. В отличие от сетки трибосопряжения № 5 на поверхности подпятника трибосопряжения № 3 сетка углублений занимала всю площадь трения за исключением поперечных гидродинамических канавок всего (120 углублений по сравнению с 75 углублениями на подпятнике трибосопряжения № 5). Более низкие, по сравнению с трибосопряжением № 3, значения коэффициента трения зафиксированы у

трибосопряжения № 4, которое имело текстуру на поверхности трения в виде спиральные канавки глубиной 1 мм в количестве 10 штук. У трибосопряжения № 4 во всей области существования гидродинамического трения наблюдался коэффициент трения ниже значения, регламентированного, но не на много (см. область I на рис. 4).

По эффективности энергосбережения, определяемой по величине среднего коэффициента трения в области II (маркеры – крестики) графика изменения коэффициента трения от частоты вращения, исследованные трибосопряжения с текстурированными поверхностями трения на подпятниках, расположились в порядке снижения пускового момента трения, в следующем порядке: № 4, 5, 3.

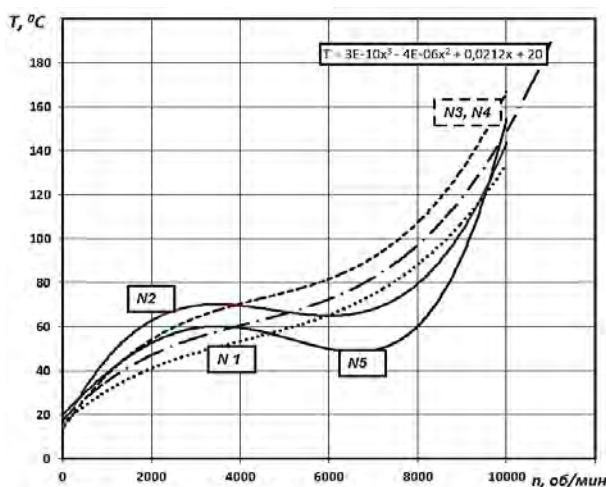


Рис. 5. Зависимость температуры масла от числа оборотов привода

Температура смазочной жидкости в режиме гидродинамического трения четко не регламентирована в конструкторской документации. Однако значение и характер изменения температуры в периоды граничного и гидродинамического трения, особенно с учетом высоких скоростей скольжения для исследуемых трибосопряжений могут быть использованы как для объяснения поведения коэффициента трения при триботехнических испытаниях, так и для понимания различия в степени износостойкости материалов трибосопряжений. Поэтому в процессе исследовательских испытаний экспериментальных трибосопряжений в данной работе значения температуры смазочной жидкости фиксировались.

Анализ результатов, приведённых на рис. 5, который показывает характер изменения температуры в процессе всего испытания, позволяет разделить исследуемые пары трения на две группы. В первую группу трибопар вошли сопряжения №1, №3 и №4. Для перечисленных сопряжений вид графиков изменения температуры от частоты вращения аналогичен, после математической обработке представляет собой кривые плавно изменяющиеся со временем: возрастающие по полиномиальному закону третьей степени:

$$T = 3^{(-10)} \cdot n^3 - 4(-6) n^2 + 0,02 n + 20.$$

Во вторую группу трибопар вошли трибосопряжения № 2 и № 5. Для этой группы трибосопряжений характерно существенное возрастание температуры в области граничного трения, в области частоты вращения 3000 об/мин, затем резкое снижение температуры и достижение минимального ее значения в области частот вращения 7000-8000 об/мин. Затем идет интенсивный рост температуры до значений, характерных первой группе трибосопряжений. Вторая мода температурного графика с минимальным значением температуры соответствует частоте вращения трибосопряжения, когда реализуется минимальный коэффициент гидродинамического трения. И регистрируемое снижение температуры в зоне трения может быть объяснено низким коэффициентом трения. Первая мода температурного графика с высоким значением температуры вероятно обусловлено тем, что граничное трение происходило в стесненных условиях из-за конструктивных особенностей сегментных подпятников.

Выводы.

Наиболее перспективными материалами для применения их в упорно-опорных подшипниках скольжения ГЦН ВВЭР являются материалы трибосопряжений № 5 (пята из стали 95X18 закаленной – сегментный подпятник с колодками из стали 95X18 с покрытием WC-10Co-4Cr пропитанным бронзой и текстурой в виде круглых в плане углублений), №2 (пята из стали 95X18 закаленной – сегментный подпятник с колодками из стали 95X18 с покрытием WC-10Co-4Cr, пропитанным бронзой), № 3 (пята из стали 95X18 закаленной – компактный подпятник из стали 95X18 с покрытием WC-10Co-4Cr, пропитанным бронзой и текстурой в виде круглых в плане углублений) и №4 (пята из керамики SiSiC – компактный подпятник из керамики SiSiC с текстурой в виде спиральных канавок). Текстура рабочих поверхностей пар трения может быть эффективным средством снижения сил трения.

1. Чичинадзе А.В., Браун Э.Д., Буше Н.А. и др. Основы трибологии (трение, износ, смазка) /Под ред. Чичинадзе А.В. -М.: Машиностроение, - 2001. - 664 с.
2. Qiu Y., Khonsari M.M. Investigation of tribological behaviors of annular rings with spiral groove // Tribology International. - 2011. -Vol. 44. -P. 1610-1619.
3. Suh M., Chae Y., Kim S., Hinoki T., Kohyama A. Effect of geometrical parameters in micro-grooved crosshatch pattern under lubricated sliding friction // Advanced Materials Research. -2008. -Vols. 47-50. - P. 507-510.

ВЛИЯНИЕ ФРЕТТИНГ-КОРРОЗИИ НА НАДЕЖНОСТЬ ШАТУННЫХ БОЛТОВ

И.М. Петрова¹, М.А. Филимонов²

¹Институт машиноведения им.А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия impetr@mail.ru

²МЦОК «Технопрогресс», ООО

Рассмотрено влияние фреттинг-коррозии на сопротивление усталости шатунных болтов. Рассмотрена возможность оценки эффективного коэффициента концентрации напряжений. Предложены рекомендации по определению коэффициента запаса по максимальным напряжениям в зависимости от требуемой вероятности безотказной работы.

Цель

Одной из наиболее ответственных деталей поршневых компрессоров являются шатунные болты, задача которых связывать верхнюю и нижнюю половинки мотылевого подшипника. Чаще всего причиной поломок шатунных болтов являются: неправильная затяжка, ослабление, а также фреттинг-коррозия призонной поверхности шатунного болта. Стержни болтов работают при динамическом нагружении при этом возникают условия появления фреттинга, которое может привести к локальному схватыванию из-за наличия продуктов фреттинг-коррозии или наоборот к ослаблению посадки в результате фреттинг износа. Ослабление болтов приводит к увеличению зазоров в мотылевом подшипнике, появлению динамических ударных нагрузок и обрыву болтов. Подшипник раскрывается, разбитый шатун срывается с шейки вала, от его ударов появляются глубокие выбоины на вращающемся валу, картере, которые, как правило, восстановлению не подлежат. В этих условиях необходимо обеспечить требуемый уровень сопротивления усталости болтов при динамическом нагружении и возможном наличии фреттинга

Методы.

Классический вариант конструкции шатунного болта представлен на рис.1, где выделена зона фреттинг-коррозии



Рис. 1. Шатунный болт

Примеры повреждения и обрыва болта показаны на рис. 2 и 3



Рис. 2. Фреттинг-коррозия болта

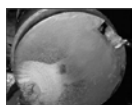


Рис. 3. Разрушение болта вследствие фреттинг-коррозии

Наиболее тяжелыми последствиями фреттинга являются усталостные повреждения, приводящие к разрушению из-за резкого снижения предела выносливости контактирующих деталей (фреттинг-усталость). Механизм развития повреждений в условиях фреттинга по своей природе сложный процесс [1-3] так как одновременно имеют место физико-химические процессы, протекающие на молекулярном уровне, и механические процессы разрушения в макроскопических объемах поверхностного слоя в зоне контакта. Эти процессы тесно связаны между собой, а преобладание того или иного механизма на различных этапах и при различных соотношениях параметров процесса по-разному влияет на сопротивление усталости. Важнейшими факторами, определяющими интенсивность процесса фреттинга, являются: амплитуда относительных перемещений, величина давления в зоне контакта, число циклов нагружения, частота колебаний при относительном перемещении. Влияние этих параметров на процесс фреттинга и на снижение сопротивления усталости, как правило, оценивалось косвенно, поэтому полученные при этом результаты требуют уточнения. Кроме того различные условия проведения испытаний не позволяют адекватно оценивать и сравнивать их результаты. Отмечено также, что существующие модели процесса фреттинга основаны на методиках, применяемых при изучении процессов износа и не позволяют достаточно адекватно прогнозировать влияние фреттинга на сопротивление усталости [2, 3] Возникающие повреждения в микрообъемах поверхностного слоя при фреттинг-коррозии являются концентраторами напряжений и приводят к образованию трещин усталости даже при низких напряжениях. В работе [4] отмечено, что скорость развития этих трещин при напессовке мала и не приводит к их заметному увеличению вплоть до весьма больших чисел циклов, соответствующих долговечности деталей, работающих в области многоциклового усталости.

Поэтому работы авторы [4] предложили характеризовать сопротивление усталости деталей с напессовками двумя пределами выносливости по началу образования трещины и по окончательному разрушению.

Влияние фреттинга при расчетах на прочность при циклическом динамическом нагружении, как правило, учесть трудно хотя характеристики сопротивления усталости в значительной степени зависят от него. Степень снижения предела выносливости при фреттинг усталости характеризуется эффективным коэффициентом concentra-

ции напряжений $K_{\sigma}^{fp} = \frac{K_{\sigma}}{K_{d\sigma}}$, который во многом зависит от давления посадки. В то же время однозначно установить зависимость между давлением посадки и K_{σ}^{fp} не представляется возможным. На рис. 4 представлены эффективные коэффициенты концентрации напряжений для различных пар исследованных материалов в зависимости от давления посадки по наиболее представительным данным [3,4] из которого видно, что значения K_{σ}^{fp} имеют большой разброс.

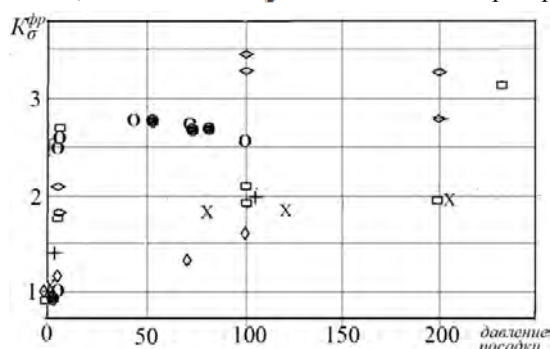


Рис. 4 Зависимость эффективного коэффициента концентрации K_{σ}^{fp} от давления посадки:

1. + -углеродистая сталь $\sigma_B = 670$ МПа, втулка – отожженная малоуглеродистая сталь; 2. X- углеродистая сталь $\sigma_B = 520$ МПа; 3. O –сталь 12ХН3А $\sigma_B = 1233$ МПа; 4. • - сталь 12ХН3А $\sigma_B = 1070$ МПа (2, 3, 4 - втулка – углеродистая сталь); 5. ◊- сплав АК4-1, втулка АК4-1; 6. □ - сталь 13Х11Н2ВМФ, втулка - сталь 13Х11Н2ВМФ; 7. ■ - сталь 3Х11Н2ВМФ, втулка АК4-1; 8. ▣ - сталь 13Х11Н2ВМФ, втулка - ВТ3-1; 9. $\diamond$ - ВТ8 - втулка ВТ3-1; 10. $\blacklozenge$ - ВТ8 - втулка сталь 13Х11Н2ВМФ

В соответствии с ГОСТ 25.504 эффективный коэффициент концентрации напряжений при фреттинге можно оценить по формуле

$$K_{\sigma}^{fp} = \frac{K_{\sigma}}{K_{d\sigma}} = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{-1d}} = \left(\frac{K_{\sigma}}{K_{d\sigma}} \right)_0 \varepsilon^I \varepsilon^{II}, \quad (1)$$

где

$$\left(\frac{K_{\sigma}}{K_{d\sigma}} \right)_0 = 0,38 + 1,48 \lg d - \text{при } d < 150 \text{ мм};$$

$$\left(\frac{K_{\sigma}}{K_{d\sigma}} \right)_0 = 3,6 - \text{при } d \geq 150 \text{ мм}.$$

Поправки ε^I и ε^{II} , учитывающие влияние предела прочности материала вала и давления напрессовки можно определить из соотношений, приведенных в [5] или по ГОСТ 25.504:

$\varepsilon^I = 0,305 + 0,00139 \sigma_B$, где величина σ_B – в МПа;
 $\varepsilon^{II} = 0,65 + 0,014 p$ – при $p \leq 25$ МПа;
 $\varepsilon^{II} = 1$ – при $p > 25$ МПа, где p – давление посадки.

Результаты.

Поршневые компрессоры, используемые в химической промышленности, являются объектами повышенной опасности. Допустимая длительность эксплуатации компрессоров исчисляется в периодах, соответствующих промежуткам времени между капитальными ремонтами (техническими освидетельствованиями) как наибольшее количество таких периодов, соответствующих длительности безопасной эксплуатации с вероятностью отказа компрессора равной 10^{-6} , которая определяется по вероятности отказа его значимых конструктивных элементов. Отсюда следует, что вероятность отказа шатунных болтов должна быть не более 10^{-6} . Болт изготовлен из стали 38ХА, с механическими свойствами $\sigma_B = 670$ МПа, $\sigma_T = 500$ МПа, $\sigma_{-1} = 270$ МПа. При отсутствии фреттинг-коррозии коэффициент запаса болта по максимальным напряжениям при динамическом нагружении равен $n = 13$ при допустимом значении $[n] = 2,5$. Фреттинг-коррозия существенно снижает значение предела выносливости и величину коэффициента запаса, что приводило к поломке болтов. Для определения необходимого коэффициента запаса, обеспечивающего требуемую вероятность безотказной работы болта, было предложено использовать выражение [5] для определения требуемой квантили нормального распределения:

$$u_p = \frac{1 - n}{\sqrt{n^2 v_{\sigma-1}^2 + v_{\sigma_a}^2}}. \quad (2)$$

где u_p – квантиль нормального распределения; $v_{\sigma-1}$; v_{σ_a} – коэффициенты вариации предела выносливости материала болта и амплитуды нагружения соответственно. Полученное значение u_p соответствующие требуемой вероятности безопасной работы позволит уточнить сроки регламентных работ при эксплуатации компрессора и обязательный срок проверки остаточного ресурса, после которого вероятность разрушения компрессора превысит 10^{-6} [6].

1. Когаев В.П., Дроздов Ю.Н. Прочность и износостойкость деталей машин. М.: «Высшая школа», 1991. 320с.
2. Петухов А.Н. Механизм фреттинга и фреттинг усталость малоподвижных соединений ГТД и ЭУ //Тр. ЦИАМ. 2008. №1338. 204с.
3. Филимонов Г.Н., Балацкий Л.Г. Фреттинг в судовых деталях. Л.: «Судостроение» 1973. 296 с.
4. Серенсен С.В., Когаев В.П., Шнейдерович Р.М. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность. М.:Машгиз. 1963. 451с.
5. Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. М.: Машиностроение. 1993. 346с.
6. Гриб В.В., Петрова И.М., Романов А.Н. Оценка вероятности отказа механических систем моделирования технического состояния. // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2016. № 5. С. 55-60.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НОЖЕЙ СИЛОВОГО РЕЗАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ

Г.А. Пилюшина, Е.А. Памфилов

Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия; gal-pi2009@yandex.ru

Исследованы основные технологические свойства сталей отечественного и зарубежного производства для изготовления дереворежущих ножей. Результаты испытаний инструментальных сталей позволили разработать рекомендации по выбору материалов для изготовления ножей силового резания древесины, режимов объемного и поверхностного упрочнения.

Введение. Процесс силового резания древесины сопровождается высокими динамическими и ударными нагрузками, приводящими к быстрому снижению остроты режущего клина. При этом износ ножей происходит преимущественно за счет выкрашивания лезвия, развивающегося в результате роста микротрещин, имевшихся в прикромочных зонах еще перед началом эксплуатации в результате термической обработки, а также образовавшихся вследствие усталости материала в процессе работы. Рост и развитие микротрещин происходит при действии сложной совокупности механохимических факторов, характерных для процессов деревопереработки, что является следствием потери работоспособности ножей и ведет к неизбежным производственным затартам [1].

Цель. Выбор рациональных материалов и технологий, позволяющих повысить износостойкость, эксплуатационную надежность и ресурс ножей силового резания древесины.

Материалы и методы. Материал для изготовления дереворежущего инструмента должен обеспечить сочетание свойств: прочность, пластичность, твердость, устойчивость против коррозии и абразива. Высокая усталостная прочность необходима для сопротивления циклически изменяющимся контактным нагрузкам. Пластичность - для сопротивления ударным нагрузкам и минимизации развития микротрещин [1, 2]. Твердость определяет стойкость материала к истиранию и абразивному износу. Коррозионная стойкость резца позволяет сопротивляться воздействию коррозионно-механического изнашивания при обработке древесины [3].

Для изготовления дереворежущих ножей традиционно используются качественные, высококачественные, легированные, быстрорежущие стали отечественного производства. Твердость, вязкость и теплостойкость высоколегированных и высококачественных инструментальных сталей обеспечивается введением легирующих элементов: хрома (Х), никеля (Н), кремния (С), марганца (Г), молибдена (М), ванадия (Ф) и других. Окончательные свойства сплава определяются соответствующей термической или термомеханической обработкой. Инструментальные материалы отечественного производства для изготовления деревообрабатывающих ножей представлены в табл. 1.

Таблица 1 Инструментальные материалы для
деревообрабатывающих ножей

Материал ножа, твердость режущей кромки	Назначение
X6BФ, 8ХНФТ, HRC 57...61	Строгальные ножи для обработки древесины мяг- ких пород
85BФ, 8Х6НФТ, HRC 55...60.	Лущильные ножи для об- работки древесины мягких пород
P18, HRC 57...60	Ножи для обработки древе- сины мягких и твердых пород
85BФ, 8ХНФТ HRC 55...60	Ножи шпонострогальных станков
9Х5ВХ, 8Х6НФТ, 6Х6В3СМФ, 6Х6В3МФС HRC 57...60	Ножи стружечных станков для обработки древесины мягких и твердых пород,
6ХС, 6ХВ2С, 55Х7ВСМФ и 55Х6В3СМФ, HRC 55...59	Ножи рубительных машин для обработки влажной древесины мягких и твер- дых пород
6ХС, 9ХС, 6ХВ2С, 60С2А HRC 50-58	Корообдирочные ножи для обработки влажной древе- сины мягких и твердых пород
60С2ХА, 45ХНМФА, 45ХН2МФА, HRC 54...58	Сучкорезные ножи для обработки влажной древе- сины мягких и твердых пород

В настоящее время на рынке деревопереработки имеется большое количество зарубежных аналогов дереворежущих инструментов, изготовленных из специальных сталей производства Германии, Финляндии, Австрии, Чехии, Японии. Эти сложнoleгированные стали близки по химическому составу, но обладают различным содержанием вольфрама и молибдена, имеют высокое содержание хрома и небольшие добавки ванадия и никеля с твердостью режущей кромки 52...58 HRC.

Необходимая твердость ножей может быть получена путем оптимизации химического состава и термической обработки режущих кромок: закалки и отпуска. Указанные в табл. 1 материалы хорошо зарекомендовали себя при установившихся процессах резания древесины и невысоких динамических нагрузках.

Однако, для сучкорезных ножей, работающих при высоких динамических нагрузках ударного действия приведенные материалы не обладают достаточной стойкостью и быстро выходят из строя, так как для сопротивления образованию

трещин важным является ударная вязкость материала, которая должна составлять не менее 8–10 Дж/см² [4].

В рассматриваемых эксплуатационных условиях, для изготовления ножей силового резания перспективными являются углеродистые стали легированные хромом, никелем, молибденом и некоторыми другими элементами, обладающие пластичностью, вязкостью и низким порогом хладоломкости. Нами были рассмотрены хромоникелевые стали аустенитного и ледобуритного класса, сочетающие необходимый набор свойств [5].

Для изготовления сучкорезных ножей харвесторных головок предложена высокоуглеродистая легированная сталь марки 7X15BMФСН содержащая углерод 0,72, хром 15,0, марганец 0,25, кремний 0,9, ванадий 0,23, никель 0,3, молибден 0,1, алюминий 0,1 и редкоземельные металлы. Режимы термической обработки, рекомендуемой стали указаны в табл. 2.

Таблица 2 Термическая обработка стали 7X15BMФСН

Закалка, °С	Отпуск, °С	Твердость, HRC	Предел прочности на сжатие, $\sigma_{сж}$, МПа	Ударная вязкость, КСЧ, Дж/см ²
1040-1070	500 -520 (двухкратный по одному часу)	52-56	3500-3800 Н	0,6-0,8

Для увеличения контактной выносливости и устранения возможных дефектов термической обработки режущие кромки ножей были упрочнены электродеформационным методом и пластическим деформированием гибким щеточным инструментом [6].

Результаты и их обсуждение.

Исследования стойкости инструментальных сталей динамической, циклической и ударной нагрузкам, коррозионно-механическому изнашиванию, а также износостойкости при истирании абразивно-кислотной суспензией проводились на соответствующих экспериментальных установках согласно разработанным методикам [4].

Результаты испытаний рекомендуемых материалов при подаче в зону трения кислотно-абразивной суспензии с pH = 4,5 представлены на рис.1.

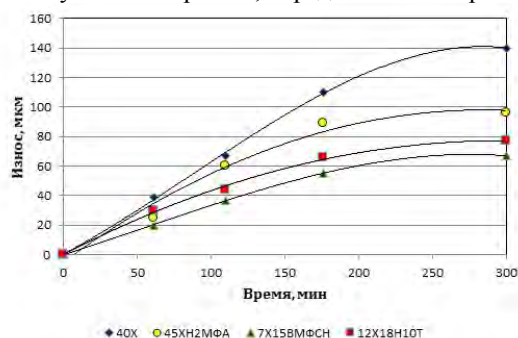


Рис. 1 Износ образцов абразивно-кислотной суспензией

Устойчивость легированных сталей к коррозии является известным фактом. Пассивность сталей 45ХН2МФА, 7X15BMФСН и 12X18H10T заключается в образовании на поверхности оксидной пленки, имеющей такую же кристаллическую решетку, как и основной металл, а также путем введения в состав ферритообразующих (Cr, Mo, Al, Si, Ti, Nb, W, V) и аустенитообразующих (Ni, C, Mn, N, Co, Cu) элементов. Однако при механическом воздействии абразивных частиц, приводящих к образованию ювенильных поверхностей, устойчивость коррозии снижается, так как образоваться оксидную пленку металл не успевает, что и приводит к образованию питтинговой или щелевой коррозии, что и наблюдается у стали 45ХН2МФА. Введение в состав стали около 13...15% хрома способствуют пассивации металла при сохранении высоких прочностных показателей (стали 7X15BMФСН, 45ХН2МФА). Высокое содержание хрома способствует снижению ударной вязкости и охрупчиванию, тогда как никель снижает энергию взаимодействия дислокаций с атомами внедрения, тем самым увеличивая пластичность и вязкость стали, что способствуют повышению сопротивления стали хрупкому разрушению. Хром, никель, алюминий, кремний, введенные в состав стали образуют непрерывную прочную оксидную пленку и повышают электродный потенциал.

Высокое содержание углерода стали 7X15BMФСН позволяет получить высокие значения механических свойств. Лезвие ножа отличается чрезвычайной твердостью и максимально долго сохраняет остроту.

Легирование сталей элементами, образующими твердые растворы замещения или внедрения, вызывает повышение прочностных характеристик. Степень упрочнения твердого раствора определяется влиянием растворенных элементов на электронную структуру атомов матрицы, которое выражается в размерном несоответствии атомов легирующего элемента и аустенита [7].

Молибден оказывает положительное воздействие на сопротивляемость питтинговой коррозии, а также повышает критическую температуру питтингообразования.

Следующая серия испытаний позволила определить эффективность поверхностной упрочняющей обработки для повышения долговечности ножей силового резания (таб.3, рис. 2.).

Одним из вариантов повышения износостойкости поверхностного слоя является обеспечение упрочнения путем механического наклепа, осуществляемого в процессе и $\gamma \rightarrow \alpha$ превращений. Благоприятное влияние на эффективность упрочнения сплавов оказывает мартенситное превращение. благодаря образованию дисперсных кристаллов. При наличии в сплаве хрома и марганца в процессе трения часть энергии расходуется на структурные превращения остаточного аустенита в мартенсит, с образованием поверхности из аусте-

нитно-мартенситной матрицы с включенными в нее карбидами хрома (таб. 3).

Таблица 3 Образцы для испытаний

№	Марка исследуемого материала	Вид поверхностной упрочняющей обработки	Структура поверхностного слоя
1	40X	-	Мартенсит
2	40X	Закалка с нагревом ТВЧ	Мартенсит мелкоигольчатый
3	7X15BMФСН	ППД эластичным инструментом	Мартенсит отпуска, карбиды
4	7X15BMФСН	Электроискровая	Мартенсит и карбиды
5	7X15BMФСН	Электродеформационная	Аустенит остаточный, мартенсит и карбиды

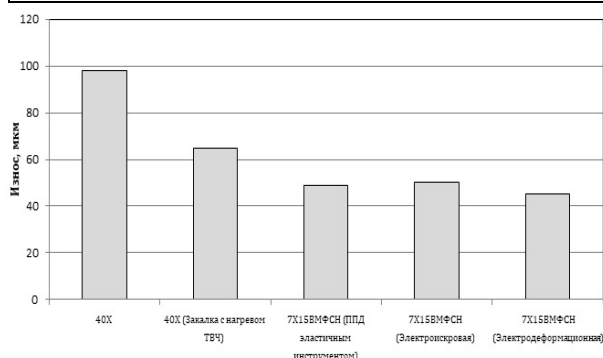


Рис. 2 Износ исследуемых образцов влажным абразивом

Высокая износостойкость исследуемой стали 7X15BMФСН при упрочнении образцов электродеформационным методом и пластическое деформирование гибким щеточным инструментом очевидна в результате протекания мартенситного превращения $\gamma \rightarrow \alpha$ и образования мелких кристаллов мартенсита деформации.

В процессе электроискровой обработки происходит разогрев и оплавление локальных зон за счет электроискрового разряда, а деформирование микрообъема материала осуществляется при температурах, соответствующих НТМО и ВТМО. В этом случае термоциклическая обработка позволяет из деформированного аустенитного зерна получить мелкозернистую структуру мартенсита, что повышает прочность на 10-20%, и ударную вязкость в 1,5 – 2 раза.

Холодная пластическая деформация приводит к упрочнению не только в следствие наклепа и увеличения дефектности структуры, но и мартенситного превращения, в результате которого из ОЦК-фазы выделяется интерметаллидная фаза NiAl.

Повышение упругих свойств в результате холодной пластической деформации обусловлено, с одной стороны, наклепом и усилением дефектности структуры γ -твердого раствора вследствие развития пластического деформирования путем скольжения и двойникования, а с другой стороны, интенсивностью протекания $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения, появлением в аустените высокодисперсных кристаллов мартенсита деформации. Количество мар-

тенсита деформации в исследуемой стали достигает 80%. При этом шероховатость поверхности уменьшается в 3,5 - 4,0 раза, а остаточные сжимающие напряжения, возникающие в поверхностном слое, имеют максимум на поверхности 800 МПа.

Так как полученные значения износостойкости электродеформационного упрочнения и пластического деформирования гибким щеточным инструментом для исследуемой стали практически равны, то в каждом конкретном случае следует руководствоваться технологическими возможностями обработки.

Выводы.

При выборе материала для изготовления ножей силового резания древесины необходимо руководствоваться показателями его структурного состояния и механических характеристик, а также технологическими возможностями упрочняющей обработки.

Из исследуемых сталей наиболее высокий уровень контактной выносливости, стойкости коррозии и абразивному изнашиванию показывает сталь 7X15BMФСН, что позволяет рекомендовать ее для изготовления ножей силового резания древесины и сучкорезных ножей харвесторных головок.

Минимизировать дефектное состояние рекомендуемого инструментального материала, снизить уровень негативных остаточных и эксплуатационных напряжений, а также исключить возможности их концентрации в опасных зонах возможно путем применения изотермической закалки и высокотемпературного двукратного отпуска.

Повысить сопротивляемость механическому поверхностному разрушению и стойкости ножевого клина к трещинообразованию можно путем пластического деформирования гибким щеточным инструментом.

- Алифанов А.В., Бурносков Н.В., Милокова А.М., Цуран В.В. Рекомендации по выбору материалов для ножей рубительных машин //Труды БГТУ. №2. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. 2014. № 2 (166). С. 185-187.
- Грибенюк Я.В., Пилюшина Г.А. Перспективные инструментальные материалы для обработки древесины Новые материалы и технологии в машиностроении: сб. науч. тр.- Брянск, 2020. № 32. С. 13-17.
- Памфилов Е.А., Пилюшина Г.А., Капустин В.В. Основы повышения износостойкости железоуглеродистых сплавов при коррозионно-механическом изнашивании //Вестник Брянского государственного технического университета. 2018. № 11 (72). С. 57-66.
- Пилюшина Г.А., Памфилов Е.А. Возможности и перспективные пути повышения работоспособности машин и оборудования лесного комплекса// Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – Архангельск, 2013. № 5. С. 129-141.
- Pilyushina G.A., Pyrikov P.G., Rukhlyadko A.S. Improving the performance of machining tools for nonmetallic materials// Russian Engineering Research. 2013. Т. 33. № 9. С. 532-535.
- Пилюшина Г.А., Памфилов Е.А., Шевелева Е.В. Повышение износостойкости сучкорезных ножей многооперационных лесозаготовительных машин// Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2019. № 6 (372). С. 174-184.
- Утевский, Л.М., Хамитов Ф.Р. О дислокационной структуре деформированного аустенита и её «наследовании» мартенситом // МнТОМ, 1966, № 4. – С. 4-6.

МЕТОД СВЕРЛЕНИЯ ОТВЕРСТИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ: АКТУАЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

А.С. Плотников

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия; asp.model.gk@gmail.com

Дан обзор актуального состояния метода сверления отверстий для определения остаточных напряжений. Описаны направления ближайшего развития метода. Предложены подходы к определению пределов достоверных измерений данным методом, повышению его точности при высоких значениях напряжений и построению методики определения неоднородных по глубине отверстия остаточных напряжений при измерении деформаций оптическими методами.

В силу своей относительной простоты метод сверления отверстий получил широкое распространение для измерения остаточных напряжений. Он характеризуется как полуразрушающий [1] механический метод. Метод сверления отверстий включает в себя три основных аспекта: способ удаления материала, способ регистрации деформаций и способ пересчёта измеренных деформаций в напряжения. История развития метода близится к столетнему юбилею (первое применение по имеющейся литературе относят к 1932 году) [2] и в настоящее время он пришёл к следующему состоянию.

Актуальное состояние метода

В качестве способа удаления материала применяют высокоскоростное сверление на малых подачах, что обуславливается минимизацией остаточных напряжений, вносимых процессами резания металла при высверливании отверстия [3 – 6].

В качестве способа регистрации деформаций используют либо измерение тензометрическими розетками [3], либо оптические методы регистрации перемещений [7] – цифровую спекл-интерферометрию (DSPI) [8] и корреляцию цифровых изображений (DIC). В зарубежных источниках основное распространение имеет метод измерения деформаций стандартными тензометрическими розетками, что связано с существованием широко используемого стандарта ASTM E 837 [3], описывающего процедуру измерений с применением таких розеток, а также метод вычисления напряжений по результатам измерений.

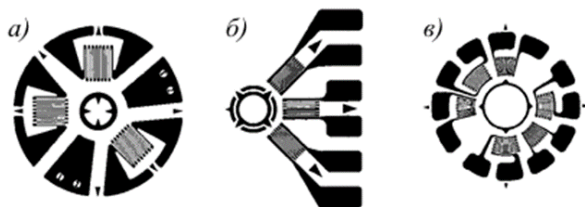


Рис. 1. Стандартные тензометрические розетки [3]

Для пересчёта результатов измерений применяются различные подходы в зависимости от способов измерения деформации. Если измерения производятся при помощи тензометрических розеток, обработка результатов выполняется по методике, описанной в стандарте ASTM E 837:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{E(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)}{2b} - \frac{E(\varepsilon_3 + \varepsilon_1)}{2a(1+\nu)} \\ \sigma_y &= -\frac{E(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)}{2b} - \frac{E(\varepsilon_3 + \varepsilon_1)}{2a(1+\nu)} \\ \tau_{xy} &= -\frac{E(\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)}{2b},\end{aligned}\quad (1)$$

где ε_i – деформация, измеренная на i -ом тензомере, а a и b – калибровочные коэффициенты, значения которых содержатся в стандарте.

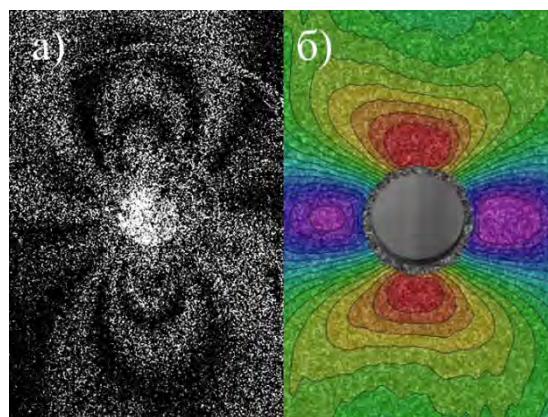


Рис. 2. Пример картины полос, полученной методом DSPI (а), и картины деформаций, полученной методом DIC (б)

В случае измерения перемещений оптическими методами, перемещения либо пересчитываются в деформации для применения уравнений (1), либо обрабатываются напрямую. Тогда вычисление напряжений выполняется по соотношениям [9]:

$$\begin{cases} u_i = \sigma_x f(r_i, \theta_i) + \sigma_y g(r_i, \frac{\pi}{2} - \theta_i) + u_0 \\ v_i = \sigma_x g(r_i, \theta_i) + \sigma_y f(r_i, \frac{\pi}{2} - \theta_i) + v_0, \end{cases}\quad (2)$$

где u_i , v_i – экспериментально измеренные перемещения точек по двум перпендикулярным направлениям, а r_i и θ_i – координаты точки в полярной системе координат связанной с отверстием. $f(r, \theta)$ и $g(r, \theta)$ – предварительно определённые калибровочные функции, которые представляют собой перемещения на поверхности тела с отверстием при приложении на контуре отверстия единичных напряжений одноосного растяжения. Уравнения вида (2) записываются для каждой точки, в которой определены величины перемещений, составляя переопределённую систему

стему уравнений, из решения которой методом наименьших квадратов отыскиваются неизвестные значения напряжений.

Калибровочные коэффициенты уравнений (1) и базисные функции уравнений (2) определяются на основании принципиально одинакового подхода, который заключается в вычислении калибровочных значений при помощи МКЭ-расчёта на модели упругого полупространства с отверстием.

Применение метода упирается в ряд ограничений, часть из которых постепенно снимается:

1. Границы тела и особенности геометрии удалены от точки исследования. Ограничение накладывается исходя из того, что калибровочные значения вычисляются на основании моделей упругого полупространства, или бесконечных пластин.
2. Поле напряжений однородно по глубине отверстия. Ограничение накладывается из-за того, что первые калибровочные значения вычислялись на основании простых моделей с равномерным распределением напряжений по глубине.
3. Поле напряжений однородно в плоскости на величину нескольких диаметров отверстия. Ограничение накладывается по тем же причинам, что и п. 2.
4. Напряжения достаточно малы чтобы не вызывать пластических деформаций в следствии концентрации напряжений при образовании отверстия. Ограничение накладывается из-за того, что калибровочные значения рассчитываются на основании линейно-упругих моделей.

Вследствие того, что предсказать наперёд расположение и форму несовершенства для любых объектов исследования невозможно, работы с ограничением №1 практически не ведутся. Что же касается остальных ограничений, то в отношении их хотя бы частичного преодоления за последние годы имеются существенные продвижения.

Оценки пределов достоверных измерений

Ограничения на уровень действующих напряжений в настоящее время напрямую не преодолены, т. е. не построена методика определения напряжений по деформациям, содержащим пластическую компоненту. Однако исследуется диапазон интенсивностей напряжений, в котором допустимо проводить измерения, не внося заметной ошибки [3, 10]. В работе [9] подробно исследуется точность определения напряжений при регистрации перемещений методом DSP1 на примере стали 09Г2С. В отношении данного ограничения представляется необходимым провести консервативную оценку диапазона достоверных измерений на примере идеальнопластичного материала, а также исследовать возможность искусственного ограничения области измерений, при наличии пластических деформаций, для повышения общей точности результатов.

Измерения градиентных в плоскости компонент напряжений

Ограничение на отсутствие градиентов в плоскости может быть преодолено расчётом калибровочных значений, учитывающих возможные градиенты в зоне отверстия. На сегодняшний день имеются отдельные работы, посвящённые этой теме [11, 12]. Для определения компонент напряжений, содержащих градиенты в плоскости, уравнения (2) преобразуются в вид:

$$\begin{cases} u_i = \sigma_x f + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} f' + \sigma_y \bar{g} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial x} \bar{g}' + u_0 \\ v_i = \sigma_x \bar{g} + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} \bar{g}' + \sigma_y f + \frac{\partial \sigma_y}{\partial x} f' + v_0 \end{cases} \quad (3)$$

где $f'(r, \theta)$ и $\bar{g}'(r, \theta)$ – калибровочные функции для градиентных компонент напряжений, а $\bar{f}(r, \theta) = f(r, \pi/2 - \theta)$. Разрешение составленной из уравнений подобного вида системы происходит уже относительно четырёх неизвестных. Легко заметить, что решение подобной системы для стандартных тензометрических розеток невозможно в силу недостаточной её определённости. Для вычисления напряжений с учётом градиентных компонент на основании тензометрических измерений должны применяться нестандартные конструкции из отдельных датчиков, либо должны быть спроектированы новые розетки с большим количеством чувствительных элементов.

Измерение напряжений с градиентом по глубине

Ограничение на однородность поля напряжений по глубине отверстия является, вероятно, самым существенным среди перечисленных. Большинство процессов, генерирующих остаточные напряжения, формируют поля, имеющие градиент по нормали к поверхности. Тем не менее, в отношении данного ограничения прогресс ограничивается методикой определения неоднородных по глубине напряжений, приведённой в стандарте ASTM E 837 и опирающейся на измерения деформаций стандартными тензометрическими розетками при ступенчатом заглублении отверстия. В этом случае уравнения (1) преобразуются к матричному виду:

$$\begin{cases} \bar{a}P = \frac{\epsilon}{(1+\nu)}P \\ \bar{b}Q = E\epsilon \\ \bar{b}T = Et \end{cases} \quad (4)$$

где p, q, t – вектора, составленные из приращений компонент деформаций, а P, Q и T – из компонент напряжений. Индекс j соответствует шагу по глубине, а смысл элементов матрицы коэффициентов приведён на рисунке 4.

Подход, применяемый в стандарте, имеет существенный недостаток, заключающийся в том, что матрица коэффициентов является плохо обусловленной, в связи с чем вычисленные значения напряжений могут иметь выбросы [3]. Для частичного снижения этого эффекта применяются методы регу-

ляризации при решении системы уравнений (4).

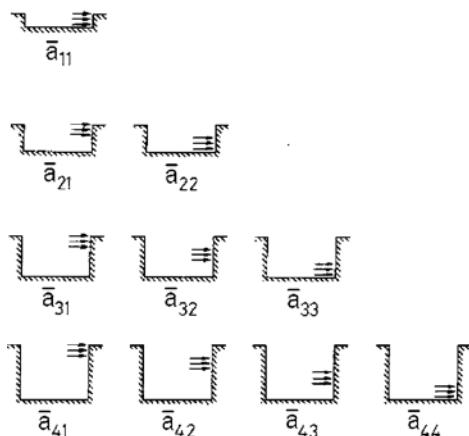


Рис. 3. Пояснения к смыслу коэффициентов уравнения (4) [3]

Этим недостатком не обладают измерения, выполненные оптическими методами, так как они формируют переопределённую систему уравнений. Несмотря на это, имеющиеся публикации [7] опираются на вычисление деформаций по результатам оптических измерений и приводят определение напряжений к решению той же системы вида (4), не используя преимущества оптических измерений.

В этой связи необходимо разработать методы вычисления остаточных напряжений, имеющих градиент по глубине непосредственно по результатам оптических измерений перемещений точек поверхности тела. При рассмотрении процесса заглабления отверстия как непрерывного, перемещения на поверхности будут описываться уравнениями (5), которые для простоты записаны для случая одноосного напряжённого состояния:

$$\begin{cases} u(r, \theta, h) = \int_0^h C(r, \theta, h, z) \sigma_x(z) dz \\ v(r, \theta, h) = \int_0^h S(r, \theta, h, z) \sigma_x(z) dz \end{cases} \quad (5)$$

В уравнениях (5) h – полная текущая глубина отверстия, z – глубина залегания слоя в пределах полной глубины отверстия. Уравнения (5) представляют собой интегральные уравнения Вольтерра 1-го рода. Ядра этих уравнений C и S представляют собой функции перемещений на поверхности тела при приложении на контуре отверстия глубиной h на слой, залегающий на глубине z , единичных растягивающих напряжений. Для возможности решения системы уравнений (5) относительно напряжений потребуется установить аналитический вид функций C и S . Поскольку аналитическое решение подобной задачи затруднено, их аналитический вид может быть установлен в виде суррогатной модели по результатам МКЭ-расчётов. Данный подход аналогичен методам, применяемым при получении базисных функций f и g , применяемых в уравнениях (2), которые аппроксимируются функциями типа решений Кирша, снабжёнными дополнительными членами [13].

Используя общие соображения, можно утвер-

ждать, что функции C и S будут иметь вид:

$$\begin{cases} C(r, \theta, h, z) = c_1(r, h, z) + c_2(r, h, z) \cos(2\theta) \\ S(r, \theta, h, z) = s_1(r, h, z) + s_2(r, h, z) \cos(2\theta) \end{cases} \quad (6)$$

где c_1 , c_2 , s_1 и s_2 – убывающие функции r , h и z , которые могут быть установлены независимо.

В настоящее время непрерывную регистрацию перемещений в процессе сверления осуществить невозможно, поэтому уравнения (5) будут записываться для конечного числа глубин отверстия, соответствующих шагам по углублению отверстия и регистрации перемещений на поверхности. В этом случае процесс решения уравнений может быть дополнительно облегчен путём наложения предположений о виде функции $\sigma_x(z)$ на участке между последующими шагами по глубине.

Наконец, существование аналитического вида выражений C и S позволит перейти к уравнениям вида (5), но записанным для зарегистрированных на поверхности деформаций, которые позволят проводить обработку результатов измерений тензометрическими датчиками.

1. Биргер И.А. Остаточные напряжения. М.: МАШГИЗ, 1963. 232 с.
2. Mathar J. Determination of Initial Stresses by Measuring the Deformations around Drilled Holes // Trans. ASME. 1934. No. 56. P. 249 – 254
3. ASTM E 837-13a. Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method. 1-st ed. Philadelphia: ASTM International, 2013. 17 p.
4. Flaman M.T. Investigation of Ultra-High Speed Drilling for Residual Stress Measurement by the Center Hole Method // Experimental Mechanics. 1982. V. 22. No. 1. P. 26 – 30.
5. Flaman M.T., Herring J.A. Comparison of Four Hole Producing Techniques for the Center-Hole Residual-Stress Measurement Method // Experimental Mechanics. 1985. V. 9. No. 8. P. 30 – 32.
6. Анпилов А.В. и др. Определение остаточных сварочных напряжений на основе совместного использования методов голографической интерферометрии и конечных элементов. М.: МИФИ, 2007. 124 с.
7. Schajer G.S. Advances in Hole-Drilling Residual Stress Measurement // Proceedings of the XI-th International Congress and Exposition. Orlando, Florida, USA. 2008.
8. Гужов В.И., Ильиных С.П. Компьютерная интерферометрия. Новосибирск: Издательство НГТУ, 2003. 311 с.
9. Апальков А.А., Одинцев И.Н., Плотников А.С. Оценка диапазона достоверных измерений остаточных напряжений методом сверления отверстий // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2016. Т.82. №2. С.47-52.
10. Seifi, R., Salimi-Majd, D., Effects of Plasticity on Residual Stresses Measurement by Hole Drilling Method, Mechanics of Materials (2012)
11. Karakozov E., Odintsev I., Plotnikov A., Plugatar T. Determination of high-gradient components of residual stress by data of test hole drilling method // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Conference of Young Scientists and Students ToPME 2019, Moscow: Institute of Physics Publishing, 2020.
12. Е. В. Каракозов, И. Н. Одинцев, А. С. Плотников, Т. П. Плугатарь Оценка высокоградиентных компонент остаточных напряжений по данным метода сверления зондирующих отверстий // МИКМУС – 2019. Москва: ИМАШ РАН, 2020. – С. 90-93.
13. Апальков А.А. Исследование остаточных напряжений в элементах конструкций ЯЭУ методом сверления отверстий и цифровой спекл-интерферометрии. Дисс. канд. техн. наук. Москва. 2005. 173 с.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕЖИМА ТРЕНИЯ В ПОДШИПНИКЕ СКОЛЬЖЕНИЯ

С.Г. Попов*, Ю.Н. Казаков, А.В. Корнаев, Л.А. Савин

Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, Орел, Россия;

*sg.popov@pm.me

В данной работе представлены результаты работы над программно-аппаратным комплексом, который позволяет определить режим трения в гидродинамическом подшипнике. Приведено описание экспериментальной установки, включающей роторно-опорный узел, питающую систему и программно-аппаратный комплекс для фиксации результатов эксперимента. Изложена методика проведения эксперимента. Приведены результаты обучения нейронной сети. Выявлена точность оценки определения режима трения в подшипнике нейронной сетью.

Введение

Своевременное определение режима трения в гидродинамических подшипниках скольжения позволяет предотвратить его повышенный износ и преждевременный выход из строя. Использование машинного обучения в поиске таких аномальных состояний позволяет значительно уменьшить время отклика на определение нестабильных состояний в подшипниках скольжения [1,2].

Целью данной работы является создание системы, определяющей режим работы гидродинамического подшипника в режиме реального времени с помощью методов машинного обучения.

Материалы и методы

Для создания обучающей выборки был проведен двухфакторный рандомизированный эксперимент. Изменяемыми параметрами являлись:

- состояние кранов питающих камер (норма/засор);
- скорость вращения ротора.

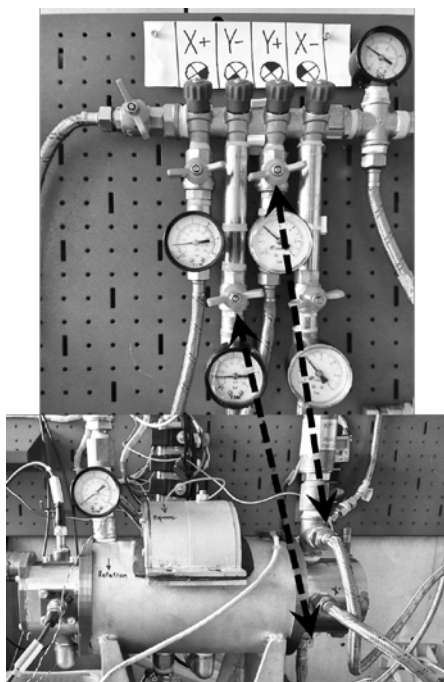


Рис. 1. Общий вид роторной системы

На рис. 1 представлен общий вид двухопорной роторной системы. Стрелками указано расположение питающих кранов, которые меняли свое состояние в процессе исследования. Скорость вращения ротора составляла: 1000, 1500 и 2800 об/мин.

В ходе эксперимента использовались индуктивные датчики перемещения для получения траекторий движения вала, датчики давления на входе питающих камер подшипников, датчик крутящего момента, пары температурных датчиков, а также датчика касания вала и подшипника.

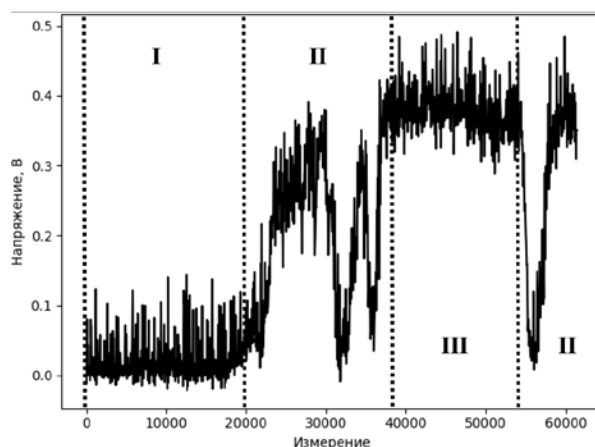


Рис. 2. Показания датчика касания в соответствии с режимами трения: смешанное трение (I), неустойчивое гидродинамическое трение (II), гидродинамическое трение (III)

Особенностью данного эксперимента являлось использование датчика касания вала, на основе показаний которого была проведена разметка данных для обучающей выборки нейронной сети. Пример графика получаемых измерений с данного датчика приведен на рис. 2. В ходе исследования было принято, что область I на рис. 2 соответствует смешанному трению, область II соответствует неустойчивому гидродинамическому трению и область III соответствует устойчивому гидродинамическому трению.

Следует отметить, что данные, полученные датчиком касания вала и подшипника, предназначены для разметки обучающей выборки, и показания данного датчика не передаются на вход нейронной сети. По результатам обучения нейронной сети было

выявлено, что значимыми для обучения являются показания датчиков давления и виброперемещения.



Рис. 3. Внешний вид программно-аппаратного комплекса

Аппаратная часть комплекса создана на базе микрокомпьютера Raspberry Pi и платы расширения. Плата расширения предназначена для сбора данных с аналоговых и цифровых датчиков и разработана на основе микроконтроллера серии STM32G071, 8-канального аналогово-цифрового преобразователя MCP3208 и RTD-преобразователя MAX31865. Внешний вид программно-аппаратного комплекса представлен на рис. 3.

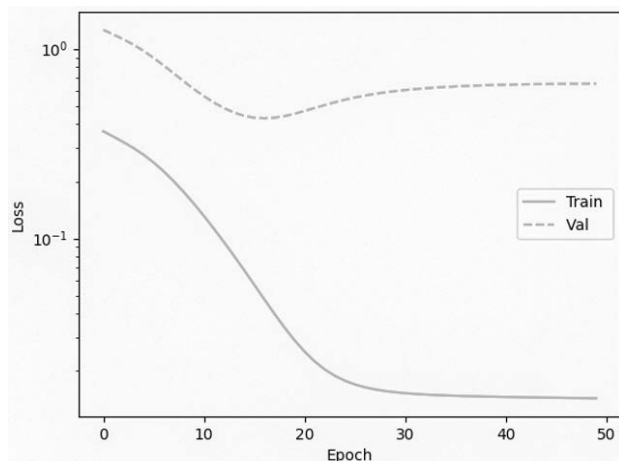


Рис. 4. График функции потерь в процессе машинного обучения

Нейронная сеть построена на основе регрессионной модели, состоящей из входного и выходного слоя и четырех скрытых слоев с помощью языка Python и библиотеки TensorFlow [3,4]. В качестве метода оптимизации использовался метод Adam [5]. Процесс обучения оценивался логарифмической функцией потерь и показан на рис. 4: пунктирной линией указан процесс для этапа валидации, сплошной линией – для этапа обучения.

Результаты и обсуждение

В ходе проведения эксперимента было проведено 84 опыта: по 5 экспериментов на каждое сочетание параметров. Время записи каждого опыта составляло 60 секунд. Частота опроса для датчиков составляла 1 кГц. После разделения данных на соответствующие классы, была получена несбалансированная обучающая выборка. Несбалансированность выборки компенсировалась назначением большего «веса» для классов с наименьшим количеством записей. Каждому из классов обучающей выборки соответствовало следующее количество записей:

- смешанное трение: 126 записей;
- неустойчивое гидродинамическое трение: 272 записи;
- гидродинамическое трение: 4726 записей.

В результате обучения описанной ранее нейронной сети, на основе данных эксперимента была получена точность 92% для тестовой выборки. Дальнейшая работа предполагает улучшение измерительной системы, а также совершенствование архитектуры нейронной сети для повышения точности определения режима трения в подшипнике скольжения.

Данная работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках гранта Президента Российской Федерации МД -129.2020.8. Авторы выражают благодарность за оказанную поддержку. Также авторы выражают благодарность А.С. Фетисову и Д.В. Шутину за помощь в разработке экспериментальной установки.

1. König F. et al. Machine learning based anomaly detection and classification of acoustic emission events for wear monitoring in sliding bearing systems // Tribol. Int. Elsevier Ltd, 2021. Vol. 155. P. 106811.
2. Lei Y. et al. Applications of machine learning to machine fault diagnosis: A review and roadmap // Mech. Syst. Signal Process. Elsevier Ltd, 2020. Vol. 138. P. 106587.
3. Python [Электронный ресурс]. URL: <https://www.python.org/>.
4. TensorFlow [Электронный ресурс]. URL: <https://www.tensorflow.org/>.
5. Kingma D.P., Lei Ba J. Adam: A method for stochastic optimization. Ithaca, NY: arXiv.org, 2015.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ КРИОГЕННОЙ ЛАЗЕРНО-УДАРНО-ВОЛНОВОЙ ОБРАБОТКИ В ИЗДЕЛИЯХ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Г.Ж. Сахвадзе

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; sakhvadze@mail.ru

Исследовано влияние новой комбинированной технологии - криогенной лазерно-ударно-волновой обработки (КЛУВО) на механические характеристики изделий машиностроения, изготовленные из алюминиевого сплава Д16. Были исследованы остаточные напряжения, возникающие в исследуемом образце при использовании различных технологий обработок. Показано, что применение комбинированной технологии обработки - предварительная 4-х часовая криогенная обработка (КО) исследуемого материала, а затем - лазерно-ударно-волновая технология (ЛУВО, далее - КЛУВО-4) обеспечивает создание более сильных полей сжимающих остаточных напряжений, чем это делает классическая технология ЛУВО.

Лазерно-ударно-волновая обработка (ЛУВО) - это инновационная и эффективная технология упрочнения, которая в поверхностном слое создает сжимающие остаточные напряжения с большими амплитудами и благоприятную микроструктуру, что приводит к улучшению основных механических свойств материалов [1-3]. Известно, что криогенная обработка (КО) — это специфический технологический процесс, при котором материалы помещаются в резервуаре с температурным диапазоном от -196°C до -130°C , и этот процесс используется для улучшения механических характеристик и их стабильности [4,5]. В частности, в работе [6] исследовано влияние КО на прочностные свойства и микроструктуру для алюминиевого сплава Д16, и показано, что после КО зерна становятся более мелкими.

Моделирование технологии КЛУВО.

В конечноэлементном пакете Abaqus было проведено численное моделирование технологии КЛУВО. Особенности такого моделирования изложены в [4-6]. Для представления моделируемых процессов на рис. 1 приведена схема аналогичного эксперимента из [6]. Исследуемый материал - алюминиевый сплав Д16 (позиция 7 на рис. 1). Длина волны лазера - 1064 нм, длительность импульса - 8 нс, энергия лазера в импульсе - 1.8 Дж, диаметр лазерного пятна - 1 мм, коэффициент перекрытия лазерных пятен - 50%. В качестве прозрачного и поглощающего слоев выбраны стекло К9 толщиной 3 мм (позиция 5) и алюминиевая фольга толщиной 120 мкм (позиция 6), соответственно. При воздействии лазерного излучения с исследуемым образцом образуется плазма (позиция 13), при расширении которой в материале распространяется ударная волна (позиция 14). Подробнее о протекающих при ЛУВО процессах изложено в работах [7-9]. В качестве хладагента используется жидкий азот. Сверхнизкая температура передается на образец через хорошо теплопроводящее основание (позиция 8), смонтированное к образцу, обеспечивавшее температуру образца в диапазоне $(-130 \pm 2)^{\circ}\text{C}$. Температура образца контролируется сверхнизким термометром i500-ULT

(позиция 12). Процедура ЛУВО начинается, когда образец достигает стабильную криогенную температуру.

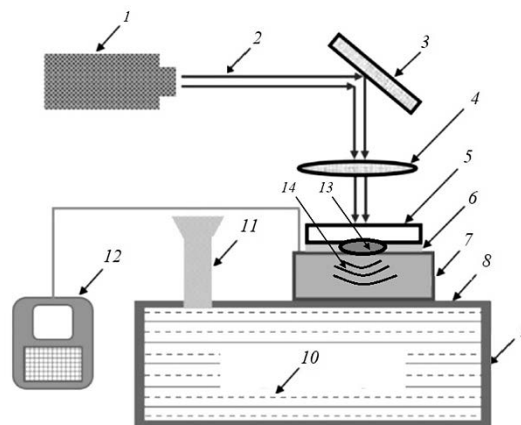


Рис. 1. Схематизация технологии КЛУВО. 1 – лазерный комплекс, 2 – лазерный луч, 3 – отражающее зеркало, 4 – фокусирующая линза, 5 – прозрачный слой (стекло К9), 6 – поглощающий слой (алюминиевая фольга), 7 – исследуемый образец (Д16), 8 – теплопроводящее основание, 9 – криогенный бак, 10 – жидкий азот, 11 – воронка, 12 – система измерения и контроля температуры, 13 – плазма, 14 – ударная волна

Определяющее соотношение.

Исследуемый материал - алюминиевый сплав Д16 – является упругопластическим однородным изотропным материалом без начальных напряжений. При ЛУВО из-за воздействия большого по величине и кратковременного по времени давления скорости деформации в исследуемом материале достигают величин 10^6 с^{-1} и более, поэтому при расчетах напряженно-деформированного состояния используется модель Зерилли-Армстронга [10], которая будет ниже использована при анализе криогенной лазерно-ударно-волновой обработки (КЛУВО). Эта модель основана на теории дислокаций, что потенциально делает ее предпочтительней других эмпирических соотношений. Более того, предполагается, что каждый тип микроструктуры материала (ГЦК, ОЦК) имеет свою зависимость. С другой стороны,

более сложная форма соотношения предполагает более сложный способ получения констант.

Модель Зерилли-Армстронга для ГЦК металлов, к которым относится исследуемый сплав Д16, имеет вид [10]:

$\sigma = C_0 + C_0 \varepsilon^{1/2} \cdot \exp[-C_3 + C_4 \ln(\dot{\varepsilon})]T$,
где C_0, C_2, C_3, C_4 – материальные константы. При этом начальное значение динамического предела текучести C_0 не зависит от скорости деформаций и температуры, но зависит от размера зерна:

$$C_0 = \sigma_a + k_H d^{-1/2},$$

где σ_a – атермическая компонента динамического предела текучести, связанная с исходной микроструктурой материала, и показывающая вклад в предел текучести растворенных веществ и начальной плотности дислокаций; d – средний диаметр зерна; k_H – коэффициент Холла-Петча, зависящий от интенсивности микроструктурных напряжений.

Значения констант в модели Зерилли-Армстронга для исследуемого сплава Д16 (ГЦК) приводятся в табл. 1 [6].

Таблица 1. Константы в модели Зерилли-Армстронга

Материал	C_0 МПа	C_1 МПа	C_2 МПа	C_3 $K^{-1} \cdot 10^{-3}$	C_4 $K^{-1} \cdot 10^{-4}$	C_5 МПа	n
Д16 (ГЦК)	292.2	-	11.82	13.7	2.44	-	-

Теоретические предпосылки.

Во время процесса КЛУВО-4 эффект объемной усадки решетки материала происходит в среде со сверхнизкими температурами. Ниже приведены уравнения (1) - (5), которые описывают взаимосвязь между изменением температуры и изменением объема материала, а также их связь с возникшим при этом средним напряжением. Эффект объемной усадки можно описать уравнениями [6]:

$$\alpha_V = V^{-1} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p, \quad (1)$$

$$V_T = V_0 e^{\alpha_V (T - T_0)}, \quad (2)$$

где α_V – коэффициент объемного расширения (напомним, что коэффициент объемного расширения представляет собой относительное изменение объема при изменении температуры на один Кельвин при постоянном давлении), V – объем материала, V_0 – начальный объем, V_T – объем материалов после обработки, T – криогенная температура, T_0 – начальная температура. Изменение объема материала ΔV можно выразить следующим образом:

$$\Delta V = V_T - V_0 = V_0 [e^{\alpha_V (T - T_0)} - 1]. \quad (3)$$

Следовательно, коэффициент усадки объема материала θ можно выразить как:

$$\theta = \frac{\Delta V}{V_0} = e^{\alpha_V (T - T_0)} - 1. \quad (4)$$

Предполагая, что объемная усадка представляет собой объемную деформацию, соответствующее среднее напряжение может быть получено в соответствии с законом Гука. Таким образом,

$$\sigma_m = K\theta = K[e^{\alpha_V (T - T_0)} - 1], \quad (5)$$

где K – модуль объемной упругости, $K = E/[3(1 - 2\mu)]$; E и μ – модуль продольной упругости Юнга и коэффициент Пуассона, соответственно; σ_m – среднее напряжение.

Из приведенного выше анализа следует, что уменьшение объема материала приводит к возникновению напряжений сжатия, которые способствуют распространению дислокаций. Однако известно, что дислокационные структуры разбросаны по всему объему. По мере увеличения времени КО плотность дислокаций еще больше увеличивается, далее эти дислокации переплетаются между собой и закрепляются на границах зерен, что способствует повышению микротвердости и прочности матрицы обрабатываемых материалов [5]. Между тем, по сравнению с обработкой ЛУВО при комнатной температуре, криогенная среда при КЛУВО-4 вызывает частичное закрытие и схлопывание существующих внутренних дефектов материалов, а также растворение некоторых существующих примесей, что снижает концентрацию напряжений в процессе нагружения [6]. Следовательно, материалы будут выдерживать большую деформацию перед разрушением, что на макроскопическом уровне означает повышения пластичности.

Анализ поверхностных остаточных напряжений.

Общеизвестно, что эффективность применения технологий КО и ЛУВО во многом определяется возникшими при этом остаточными напряжениями. Особенности распределения поверхностных остаточных напряжений при различных технологиях обработки показаны на рис. 2. Видим, что как при КО, так и при ЛУВО, в алюминиевом сплаве Д16 возникают сжимающие остаточные напряжения (СОН). В исходном (необработанном) образце наблюдается небольшие технологические растягивавшие остаточные напряжения (РОН – линия 1 на рис. 2). Процесс КО эффективно снимает эти РОН и даже вызывает небольшие СОН (линия 2). Кроме того, КО перед ЛУВО (КЛУВО-4) приводит к СОН с более высокими пиковыми значениями (линия 4) по сравнению с чистым ЛУВО (линия 3). Если сравнивать количественные показатели, то средние СОН, вызванные КЛУВО-4 и ЛУВО, составляют около -245 МПа и -180 МПа, соответственно.

После КО, во время повышения температуры от криогенной до комнатной, в поверхностном слое возникают дополнительные сжимающие остаточные напряжения в следствие естественных различий в коэффициентах теплового расширения различных элементов. Между тем, высокоинтенсивная ударная волна, вызванная ЛУВО, вызывает серьезные пластические деформации на поверхности материалов, что приводит к дальнейшему распространению дислокаций и измельчению зерна. Неравномерная деформация зерен и/или субзерен и дополнительное образование дефектов, таких как дислокации, также

приводит к росту сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое. Следовательно, комбинированная обработка КО и ЛУВО (КЛУВО) создает более мощные поля сжимающих остаточных напряжений на поверхности алюминиевого сплава Д16, чем отдельная технология ЛУВО.

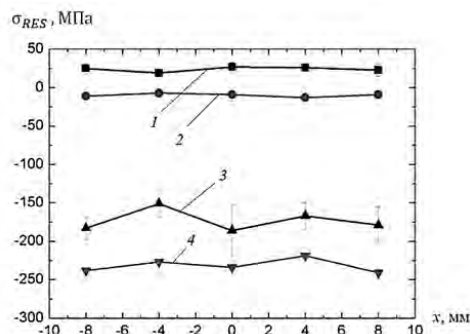


Рис. 2. Распределение поверхностных остаточных напряжений (по оси x) при разных технологиях обработки сплава Д16. 1 – образец в исходном состоянии; 2 – после обработки по технологии КО; 3 – после обработки по технологии ЛУВО; 4 – после обработки по технологии КЛУВО-4.

Стабильность сжимающих остаточных напряжений.

Стабильность сжимающих остаточных напряжений, образовавшихся в поверхностном слое материалов после различных режимов обработок, является очень важным вопросом, в особенности для усталостных свойств материалов. Максимальные усталостные напряжения, соответствующие каждому этапу нагружения, составляют 200 МПа, 260 МПа и 320 МПа соответственно. Из рис. 3 видно, что во время первого этапа нагружения остаточные напряжения, вызванные после КО (рис. 3. линия 2) и ЛУВО (рис. 3, линия 3) по-отдельности, быстро релаксировались, хотя после ЛУВО все равно остаются значительные сжимающие остаточные напряжения (около –125 МПа). Однако сжимающие остаточные напряжения образца, образовавшихся после КЛУВО (рис. 3, линия 4), почти не релаксировались после первого этапа нагружения (хотя после 2-го и 3-го этапов они

также начинают релаксироваться). Известно, что стабильность остаточных напряжений во многом зависит от предела текучести материала [6].

Отсюда следует, что КО может также улучшить стабильность остаточных напряжений, вызванных при ЛУВО. После окончания всех трех этапов нагружения, амплитуды остаточных напряжений в образцах ЛУВО и КЛУВО-4 составляли около –80 МПа и –140 МПа, соответственно.

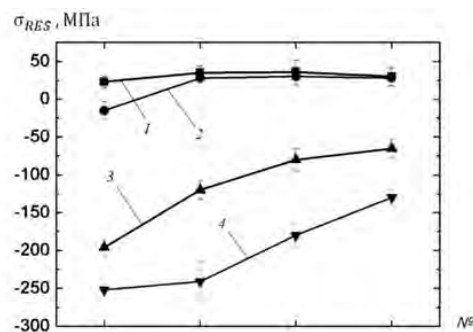


Рис. 3. Распределения поверхностных остаточных напряжений образцов из сплава Д16 после 3-х различных этапов нагружения (№): 1 – образец в исходном состоянии; 2 – после обработки по технологии КО; 3 – после обработки по технологии ЛУВО; 4 – после обработки по технологии КЛУВО-4.

Выводы.

В настоящей работе исследовано особенности применения технологии криогенной обработки (КО) и лазерно-ударно-волновой обработки (ЛУВО) как по-отдельности, так и в комбинированном виде, на остаточные напряжения алюминиевого сплава Д16. Можно сделать основной вывод, что как при КО, так и при ЛУВО возникают сильные сжимающие остаточные напряжения в поверхностном слое алюминиевого сплава Д16. Однако, амплитуда поверхностных сжимающих остаточных напряжений, индуцированных при КЛУВО, существенно больше, чем при КО или ЛУВО по-отдельности.

1. Peng L., Siyu S., Hu J. Effect of laser shock peening on the microstructure and corrosion resistance in the surface of weld nugget zone and heat-affected zone of FSW joints of 7050 Al alloy // Opt. Laser Technol. 2019. V. 112. P.1.
2. Lin L., Jiaojiao W., Jianzhong Zh. Characterization and analysis on microhardness and microstructure evolution of brass subjected to laser shock peening // Opt. Laser Technol. 2019. V. 115. P. 325.
3. Morales M., Ocaña J.L., Molpeceres C. et al. Model based optimization criteria for the generation of deep compressive residual stress fields in high elastic limit metallic alloys by ns-laser shock processing // Surf. Coat. Technol. 2008. V. 202 (11). P. 2257.
4. Jing L., Jianzhong Zh., Suqiang X. et al. Effects of cryogenic treatment on mechanical properties and microstructures of IN718 super-alloy // Mater. Sci. Eng.: A. 2017. V. 707. P. 612.
5. Xu L.Y., Zhu J., Jing H.Y. et al. Effects of deep cryogenic treatment on the residual stress and mechanical properties of electron-beam-welded Ti-6Al-4V joints // Mater. Sci. Eng.: A. 2016. V. 673. P. 503.
6. Jianzhong Zh., Suqiang X., Shu H., et al. Tensile properties and microstructures of a 2024-T351 aluminum alloy subjected to cryogenic treatment // Metals. 2016. V.6. P. 279.
7. Sakhvadze G.Zh. Enhancement of Material Crack Resistance Using Laser Shock Processing // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2020. V. 49 (4), P. 335. DOI: 10.3103/S1052618820040123.
8. Sakhvadze G.Zh., Sakhvadze G.G., Kavtaradze R.Z. Increasing the Crack Resistance of Materials by Means of Laser Shock Waves // Russian Engineering Research. 2021. Vol. 41 (1). P. 27. DOI: 10.3103/S1068798X21010202.
9. Sakhvadze G.Zh., Kikvidze O.G. The Role of Laser Shock Processing Treatment in the Growth Dynamics of Fatigue Cracks in Specimens of Ti-6Al-4V Titanium Alloys Damaged by Foreign Objects // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2020. V. 49 (10). P. 836. 2020. DOI: 10.3103/S1052618820100088
10. Zerilli F.J., Armstrong R.W. Dislocation mechanics-based constitutive relation for material dynamics calculations // Journal of Applied Physics. 1987. V. 12. P. 1816.

АНАЛИЗ МИКРОТВЕРДОСТИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА Д16 ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ТЕХНОЛОГИИ КРИОГЕННОЙ ЛАЗЕРНО-УДАРНО-ВОЛНОВОЙ ОБРАБОТКИ

Г.Ж. Сахвадзе, Г.Г. Сахвадзе

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; sakhvadze@mail.ru

Были исследованы микротвердости в образцах из алюминиевого сплава Д16 при использовании криогенной лазерно-ударно-волновой обработки (КЛУВО). Полученные результаты показали, что криогенная обработка может улучшить упрочняющий эффект, полученный классической лазерно-ударно-волновой обработкой (ЛУВО). Показано, что комбинированная технология обработки - предварительная 4-х часовая криогенная обработка (КО) исследуемого материала, а затем ЛУВО (далее – КЛУВО-4) обеспечивает более высокую микротвердость поверхности, а также создает более сильные поля сжимающих остаточных напряжений.

Алюминиевый сплав Д16 широко используется в производстве ответственных высоконагруженных узлов машин и конструкций, в особенности в машиностроительной, авиационной и аэрокосмической отраслях. Это обусловлено их высокой прочностью, пластичностью и хорошей обрабатываемостью [1]. К сожалению, суровые условия эксплуатации, в которых приходится работать этим узлам, иногда приводят к отказам в связи с образованием в них разных видов повреждений, таких как коррозия, износ от трения, усталость, трещины и даже разрушение. Поэтому крайне необходимо дальнейшее улучшение качества поверхностей этих узлов, а также повышение их усталостной прочности [2]. В последние годы было применено множество методов для изменения микроструктуры алюминиевых сплавов с целью улучшения их комплексных механических свойств [3-6]. В работах [7-8] разработан новый способ криогенной лазерно-волновой обработки (КЛУВО) для оценки влияния сверхвысокой скорости деформации и сверхнизкой температуры на механические свойства металлических материалов. Согласно последним исследованиям, при определенных условиях, КЛУВО может достичь синхронного улучшения и прочности и пластичности за счет изменения микроструктуры по сравнению с ЛУВО при комнатной температуре.

Моделирование возникновения и распространения ударных волн при ЛУВО. Приложение ударной нагрузки.

Воздействие ударной волны к исследуемой поверхности моделируется как приложенное к ней давление, характеристики которого в основном зависят от параметров лазерного излучения. Пиковое значение давления (P_p) определяется из следующего уравнения (в этом уравнении, для удобства, обычно величины пишут со своими размерностями [9-11]):

$$P_p \text{ (ГПа)} = 0.01 \cdot \frac{\alpha}{(\alpha+3)^{1/2}} \cdot [Z \text{ (гр. см}^{-2}\text{с}^{-1})]^{1/2} \cdot [I \text{ (ГВт/см}^2\text{)}]^{1/2},$$

где α - корректирующий безразмерный коэффициент (принимается, что возникшая при ЛУВО плазма является идеальным газом с корректирующим ко-

эффициентом α), и он характеризует эффективность (к.п.д.) процесса взаимодействия лазерного излучения с поверхностью. При этом принимается, что часть энергии αE идет на увеличение давления, а остальная часть энергии $(1-\alpha)E$ - на генерирование и ионизацию плазмы (заметим, что α меняется в пределах от 0.1 до 0.25). В случае использования воды в качестве окружающей среды $\alpha=0.17$ (означающий, что только 17 % начальной плотности энергии лазерного излучения используется для повышения давления плазмы) ($\alpha=1$ для идеального газа); I - пиковая интенсивность лазерного излучения (в нашем случае она равна 10.2 ГВт/см^2), Z - акустический импеданс, $Z_i = \rho_i D_i$, где индекс i обозначает исследуемый материал ($i=1$) или прозрачный слой ($i=2$), ρ_i - плотность и D_i - скорость ударной волны в соответствующей среде; Z - приведенный импеданс ударной волны

$$\frac{2}{Z} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2},$$

В таблице 1 приведены величины Z_1 и Z_2 для наиболее часто используемых при ЛУВО материалов и прозрачных слоев [4].

Таблица 1. Акустические импедансы некоторых часто используемых при ЛУВО материалов и прозрачных слоев

Материал (Зарубежный аналог)	$Z_1 \cdot 10^6$ (гр/см ² с)	Прозрачный слой	$Z_2 \cdot 10^6$ (гр/см ² с)
BT6 (Ti-6Al-4V)	2.75	Вода	0.17
Д16 (Al 2024-T351)	1.50	Плексиглас	0.32
0X18H10 (SS304)	3.61	Силиконовая резина	0.47
Mg-Ca	0.88	Стекло К9	1.14
08X18H10 (AISI 4140)	3.96	Кварцевое стекло	1.31
Cu	0.16	Стекло Pb	1.54
8X18H10T (SS321)	4.00	Стекло Bk	1.44

Для алюминиевого сплава Д16 акустический импеданс равен $Z_1 = 1.5 \cdot 10^6 \text{ гр. см}^{-2}\text{с}^{-1}$, для воды $Z_2 = 0.17 \cdot 10^6 \text{ гр. см}^{-2}\text{с}^{-1}$.

Пространственное распределение импульса давления принимается как квазигассова функция [3]:

$$P(x, y, t) = P(t) \cdot \left(-0.85 \frac{x^2 + y^2}{R^2} \right),$$

где x и y – координаты исследуемой точки по поверхности, а R – радиус лазерного импульса. Интервал времени 10^{-5} с между последовательными импульсами оказался периодом времени, достаточным для расчета остаточных напряжений [1]. Эти данные, а также шаблоны схем сканирования были запрограммированы с помощью подпрограммы VDLOAD Abaqus.

Механизм возникновения остаточных напряжений при одиночном «выстреле» лазерным лучом похож на механизм их возникновения при горячей посадке [3]. При условии, что внешний радиус трубы бесконечен, поле остаточных напряжений, создаваемое горячей посадкой, может быть выражено следующим образом (рис. 1) [3]:

$\sigma_r = -k$, $\sigma_\theta = -k$, при $r \leq R$;
 $\sigma_r = -k(r/R)^{-j}$, $\sigma_\theta = (j-1)k(r/R)^{-j}$, при $r > R$,
где σ_r – радиальное остаточное напряжение, σ_θ – угловое остаточное напряжение, k – остаточное напряжение в зоне пятна и j – показатель затухания (обычно для разных материалов варьируется от 1,5 до 2).

На рис. 1 представлены декартовы остаточные напряжения σ_x и σ_y , а также радиальные и окружные остаточные напряжения σ_r и σ_θ , соответственно. Заметим, что разница между значениями σ_x и σ_y (анизотропия ОН) во внешней зоне единичного пятна играет решающую роль при применении зигзагообразной схемы сканирования.

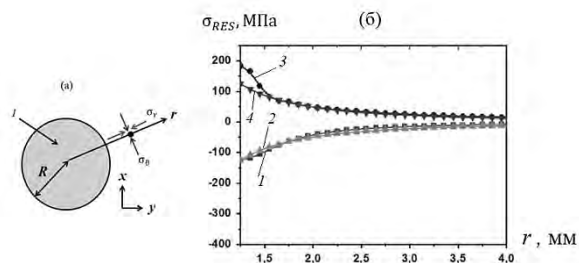


Рис. 1. (а) – лазерное пятно (I) и радиальные (σ_r) и окружные (σ_θ) остаточные напряжения во внешней зоне лазерного пятна; (б) – значения радиальных (σ_r , 1 – моделирование, 2 – эксперимент [3]) и окружных (σ_θ , 3 – моделирование, 4 – эксперимент [3]) остаточных напряжений, возникающих в образцах после 1 лазерного импульса.

Распределение микротвердости по глубине.

Существует ряд предположений по установлению количественных связей между остаточными напряжениями и твёрдостью. В настоящей работе мы рассмотрим модель Ларсона-Карлсона, предложенную в работе [12]:

$$H = \frac{H_0}{1 - (\sigma_R / 3\sigma_T)},$$

где H – твёрдость при наличии остаточных напряжений, H_0 – начальная твёрдость (при отсутствии остаточных напряжений), σ_R – остаточное напряжение, σ_T – предел текучести материала. Формула

получена для случая плоского однородного напряженного состояния.

На рис. 2 показаны распределения микротвердости по глубине при разных технологиях обработки поверхностей сплава Д16. Видно, что в образце исходном состоянии (до обработок), наблюдается довольно однородное распределение микротвердости по глубине. Анализ их распределения после различных обработок показал, что во всех случаях микротвёрдость постепенно уменьшается с увеличением глубины от верхней поверхности (напомним, что ЛУВО (линия 2) и КЛУВО (линия 3) – это технологий ЛУВО, проведенные при комнатной и криогенной температурах, соответственно, КЛУВО-4 (линия 4) – выдержка криогенной температуры в течение 4-х часов с последующим ЛУВО). Если оценивать протекающие процессы количественно, то имеем следующую картину: микротвердость исходного необработанного образца на поверхности составляет около 132 HV, а ее значение после ЛУВО – около 165 HV, что на 25% выше, чем у образца в исходном состоянии.

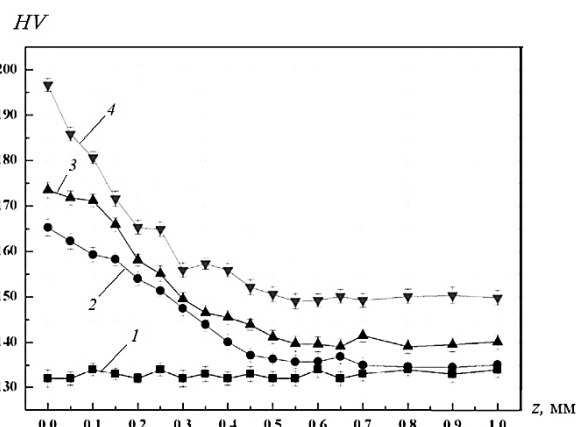


Рис. 2. Распределения микротвердости по глубине образца при разных технологиях обработки сплава Д16. 1 – образец в исходном состоянии; 2 – после обработки по технологии ЛУВО; 3 – после обработки по технологии КЛУВО; 4 – после обработки по технологии КЛУВО-4;

Тем временем, видим, что при обработке поверхности по технологии КЛУВО получается более высокая микротвердость поверхности, чем при ЛУВО, и это значение еще увеличивается с увеличением времени выдержки КО до 4 часов. Микротвердости на поверхности при КЛУВО и КЛУВО-4 достигают значений 173 HV и 197 HV, соответственно, что на 24,48% и 39,74% выше, чем у образца с ЛУВО. Однако, следует отметить, что увеличение микротвердости по глубине при КЛУВО (т.е., ЛУВО при криогенной температуре), была выше, чем микротвердость, полученная при ЛУВО (т.е. при комнатной температуре), а наилучший эффект упрочнения, как и ожидалось, достигается при выдержке КО в течение 4 часов с последующим ЛУВО (т.е. при КЛУВО-4 режиме).

Релаксация остаточных напряжений.

Как показано на рис. 3, ЛУВО является важной технологией обработки исследуемых образцов «по поверхности», в то время как КО можно определить как технологию обработки «по объему». В процессе КО пластическая деформация в основном происходит за счет эффекта объемной усадки, что приводит к выделению вторых фаз и некоторому внутреннему перераспределению напряжений внутри обрабатываемых материалов [8].

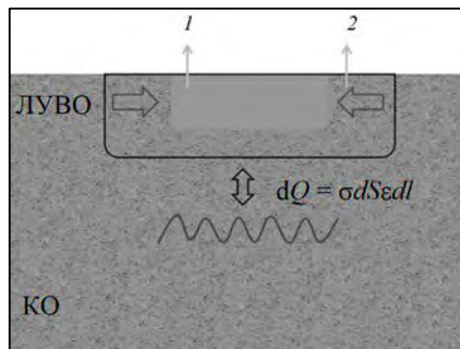


Рис. 3. Схематизация процессов, протекающих в материале при применении технологии КЛУВО. 1 – область пластических деформации, 2 – область остаточных напряжений

Рассмотрим протекающие при КЛУВО процессы с энергетической точки зрения. Очевидно, что в любом микротеле, находящемся внутри полей остаточных напряжений (выделено прямоугольником на рис. 3), при деформировании происходит накопление упругой потенциальной энергии, которая может быть определена следующим образом [7]:

$$dQ = \sigma dS \epsilon dl.$$

где Q - рассеянная энергия, σ - остаточное напряжение, ϵ - остаточная деформация. dS и dl - эквивалентная площадь поперечного сечения и эквивалентная длина микротел, соответственно. Во время эксплуатации упрочнённого изделия, на обработанную КЛУВО поверхность воздействуют переменные нагрузки, которые непрерывно воздействуют с существующими там полями остаточных напряжений. Процесс релаксации остаточных напряжений при этом представляет собой процесс перехода от упругой деформации к пластической. Таким образом, рассматривая процессы с энергетической точки зрения, получили, что чем стабильнее полученные остаточные напряжения, тем больше упругая потенциальная энергия накапливается внутри микротел, и для релаксации остаточных напряжений требуется все больше внешних сил. Другими словами, чем больше амплитуда сжимающих остаточных напряжений, тем больше должна быть приложенная внешняя нагрузка, чтобы произошла релаксация остаточных напряжений.

Выводы.

В настоящей работе исследовано влияние применения технологии криогенной обработки (КО) и

лазерно-ударно-волновой обработки (ЛУВО) как по-отдельности, так и в комбинированном виде, на микротвердость алюминиевого сплава Д16, из чего можно сделать следующие основные выводы:

1. Показано, что упрочняющим эффектам в сплаве Д16 способствует возникший синергетический эффект от суперпозиции процессов, протекающих при КО и ЛУВО, что индуцирует более мощные и стабильные сжимающие остаточные напряжения. При КЛУВО, по всей видимости, в материале наблюдается благоприятная эволюция микроструктуры, что выражается в дополнительном измельчении зерен, распространении большего количества дислокаций, что играет ключевую роль в повышении механических свойств алюминиевого сплава Д16.
2. По сравнению с классической технологией ЛУВО, микротвердость поверхности образца из Д16 при КЛУВО и КЛУВО-4 были увеличены на 24,48% и 39,74% , соответственно.

1. Hfaiedh N., Peyre P., Song H. et al. Finite element analysis of laser shock peening of 2050-T8 aluminum alloy // *Int. J. Fatigue*. 2015. V. 70. P. 480. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2014.05.015>.
2. Sano Y., Masaki K., Gushi T., Sano T. Improvement in fatigue performance of friction stir welded A6061-T6 aluminum alloy by laser peening without coating // *Mater. Des.* 2012. V. 36. P. 809.
3. Ocaña J.L., Molpeceres C., Gómez G., Porro J.A., Morales M. Experimental assessment of materials treatment by laser shock processing // *Appl. Surf. Sci.* 2004. V. 238. P. 501.
4. Peng L., Siyu S., Hu J. Effect of laser shock peening on the microstructure and corrosion resistance in the surface of weld nugget zone and heat-affected zone of FSW joints of 7050 Al alloy // *Opt. Laser Technol.* 2019. V. 112. P.1.
5. Lin L., Jiaojiao W., Jianzhong Zh. Characterization and analysis on microhardness and microstructure evolution of brass subjected to laser shock peening // *Opt. Laser Technol.* 2019. V. 115. P. 325.
6. Morales M., Ocaña J.L., Molpeceres C. et al. Model based optimization criteria for the generation of deep compressive residual stress fields in high elastic limit metallic alloys by ns-laser shock processing // *Surf. Coat. Technol.* 2008. V. 202 (11). P. 2257.
7. Xu L.Y., Zhu J., Jing H.Y. et al. Effects of deep cryogenic treatment on the residual stress and mechanical properties of electron-beam-welded Ti-6Al-4V joints // *Mater. Sci. Eng. A*: 2016. V. 673. P. 503.
8. Jianzhong Zh., Suqiang X., Shu H., et al. Tensile properties and microstructures of a 2024-T351 aluminum alloy subjected to cryogenic treatment // *Metals*. 2016. V.6. P. 279.
9. Sakhvadze G.Zh. Enhancement of Material Crack Resistance Using Laser Shock Processing // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2020. V. 49 (4), P. 335. DOI: 10.3103/S1052618820040123.
10. Sakhvadze G.Zh., Sakhvadze G.G., Kavtaradze R.Z. Increasing the Crack Resistance of Materials by Means of Laser Shock Waves // *Russian Engineering Research*. 2021. Vol. 41 (1). P. 27. DOI: 10.3103/S1068798X21010202.
11. Sakhvadze G.Zh., Kikvidze O.G. The Role of Laser Shock Processing Treatment in the Growth Dynamics of Fatigue Cracks in Specimens of Ti-6Al-4V Titanium Alloys Damaged by Foreign Objects // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2020. V. 49 (10). P. 836. 2020. DOI: 10.3103/S1052618820100088
12. Carlsson S., Larsson P.L. On the determination of residual stress and strain fields by sharp indentation testing. Part 1: theoretical and numerical analysis // *Acta mater.* 2001. V. 49. P. 2179.

3D-ПЕЧАТЬ КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ПО ТЕХНОЛОГИИ LCM

Н.М. Стонов

ООО «ЭНЕРГОАВАНГАРД», Москва, Россия; sgonov@eav.su

Темпы внедрения аддитивных технологий на отечественные предприятия увеличиваются с каждым годом, а сами технологии становятся все более изученными и понятными. В основном это относится к изготовлению изделий из металла и пластика. Однако про аддитивное производство изделий из керамики мало кому известно в России, несмотря на то, что это направление активно развивается за рубежом и пользуется большим спросом.

Введение.

Нам всем известны традиционные методы формообразования керамики, но я бы выделил 2 основных метода – это прессование и литье. У данных методов формообразования есть недостатки такие, как:

- Изготовление дорогостоящей оснастки
- Трудоёмкий процесс дальнейшей механической обработки из-за свойств керамики таких как, отсутствие пластичности, высокая твердость, склонность к растрескиванию.
- Нет возможности изготавливать сложные конструкции
- Большие временные затраты на ОКР и НИОКР.

Основной целью доклада является ознакомление с технологией LCM (Lithography-based Ceramic Manufacturing) - производством изделий из керамики с помощью литографии, а также возможными сферами ее применения.

О технологии.

Процесс изготовления заключается в следующем: CAD-модель изделия в специальном программном обеспечении разрезается на 2D-слои и отправляется в систему послойного синтеза. С помощью системы подачи материала керамическая суспензия (смесь керамического порошка и связующего на основе фотополимера) поступает в ванну, где равномерно распределяется по поверхности с помощью рекоутера. Далее платформа построения опускается в ванну до полного соприкосновения. Снизу находится проектор ультрафиолетового излучения, который выборочно засвечивает сечение CAD-модели до момента фотополимеризации суспензии. Затем платформа поднимается, суспензия заново разравнивается с помощью рекоутера, платформа построения опускается и процесс повторяется до полного выращивания изделия.

Полученная «грин-модель» в дальнейшем проходит традиционные этапы постобработки: дебайдинг (удаление связующего) и спекание для уплотнения керамических частиц и получения требуемых характеристик конечно изделия.

Экспонирование на платформу построения происходит выборочно, т.е. только по сечению CAD-модели. И экспонирование сечений

CAD-моделей происходит одновременно, поэтому количество изделий на платформе не влияет на общее время построения.



Рис. 1. Принципиальная схема LCM-технологии компании Lithoz: 1) – платформа построения; 2) – ванна с суспензией; 3) – оптическая система; 4) – LED-проектор

Оборудование использует такое количество материала, которое необходимо для выращивания изделий. И та суспензия, которая осталась в ванне после процесса печати, может использоваться заново. И также оборудование является открытым к использованию сторонних материалов, что позволяет разрабатывать и использовать любой собственный материал, который удовлетворяет техническим требованиям.

О материалах.

Суспензия представляет из себя сметанообразную консистенцию, которая состоит из керамического порошка и связующего (фотополимера). Материалы имеют широкий спектр материалов, в суспензиях используются те же порошки, что и в традиционных методах формообразования, возможны разработки специальных материалов под требования Заказчика.

Имеется обширный перечень материалов. Стандартные материалы (разработанные): оксид алюминия, диоксид циркония, нитрид алюминия, двуокись кремния, трикальцийфосфат, гидроксипатит, оксид алюминия, упрочненный цирконием. Материалы, которые находятся в разработке: нитрид алюминия, пьезокерамика, диэлектрическая керамика, прозрачная керамика, дисиликат лития. Материалы, которые были разработаны под требования клиентов: кордирит, реголит, оксид магния, фарфор.

Таблица 1. Характеристики стандартных материалов [1]

	Оксид алюминия	Диоксид циркония	Нитрид кремния
Прочность при 4-х точечном изгибе	430 МПа	935 МПа	760 МПа
Плотность	>99.4%Т.П.	>99.8% Т.П.	>99.6%Т.П.
Шероховатость поверхности, Ra	≈0.4 мкм	<1.0 мкм	≈0.7 мкм
Макс. рабочая Температура, °C	1650	1500	1200

Применения.

Керамические изделия находят себя во многих отраслях таких, как космическая промышленность, электроника, военно-промышленный комплекс, атомная и ядерная промышленность, авиастроение, режущий инструмент, медицина и стоматология.

Возможна печать изделий в самом высоком разрешении, где стенки изделия могут быть около 55 мкм, а отверстия около 100 мкм.

Изготовление рабочих колес для микротурбин из нитрид кремния. Использование керамических роторов вместо металла уменьшает силу инерции и, следовательно, уменьшает задержку. Кроме того, эти роторы подвергаются воздействию очень горячего газа и поэтому должны быть долговечны в таких условиях. Сегодня технология LCM облегчает производство крыльчаток сложной формы для повышения производительности микротурбин.

Стало возможным производство аэрокосмических и промышленных газовых турбин с помощью аддитивных технологий. Благодаря 3D-печати стержней для литья у вас появляются следующие конкурентные преимущества: свобода проектирования, сокращение времени на производство, снижение затрат

Изготовление изделий из микротехнологического проектирования. Аддитивное производство обеспечивает решения для проектирования сложных форм твердотопливных элементов и теплообменников.

В атомной промышленности возможно изготавливать изоляторы и резонаторы сложных форм. На разработку и изготовление новых изделий с помощью технологии LCM уходят недели вместо месяцев,

если изготавливать традиционными методами формования.

Заключение.

Обработка керамики и контроль являются основными составляющими в балансе стоимости керамических изделий. По некоторым данным, стоимость исходных материалов составляет всего лишь 11 % (для металлов 43 %), в то время как на обработку приходится 38 % (для металлов 43 %), а на контроль 51 % (для металлов 14 %).

Отсутствие пластичности, высокая твердость, склонность к растрескиванию, низкая стойкость к тепловым ударам осложняют механическую обработку керамических материалов. Особенно сложно организовать процесс высокоточной обработки изделий из керамики на серийном и массовом производстве. Технология LCM позволяет уйти от трудоёмкого процесса механической постобработки, что позволяет сократить как финансовые затраты, так и временные.

Основными преимуществами данной технологии является получение изделий со сложной геометрией, которые нельзя получить традиционными методами. Речь идет о сетчатых структурах, внутренних каналах или отверстиях 100 мкм, тонких стенках 55 мкм, элементов сложной конфигурации, а также достижение точности изготовления до 20 мкм в зависимости от габаритов изделий. При этом нет необходимости изготавливать дорогостоящую оснастку, что значительно снижает себестоимость продукции. В итоге время на проведение НИР и НИОКР сокращается в разы, что позволяет выводить на рынок инновационную конкурентоспособную продукцию в кратчайшие сроки [2].

1. Johannes Homa. A Novel Additive Manufacturing Technology for High-Performance Ceramics, 2014.
2. М.К. Романов, Л.И. Журавлева. Анализ технологической и экономической целесообразности применения аддитивных технологий при изготовлении керамических деталей // Стекло и керамика. 2019 № 9

ПЕРСПЕКТИВЫ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ПРЕЦИЗИОННЫХ МНОГОКООРДИНАТНЫХ МАШИН С ЧПУ МЕТОДАМИ ЦИФРОВОЙ КОРРЕКЦИИ НА ОСНОВЕ ИНФОРМАЦИИ О ТОЧНОСТИ ДВИЖЕНИЯ ОСНОВНЫХ УЗЛОВ

Н.А. Серков¹, О.В. Пась²

¹Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; serkov1943@mail.ru

²ФГУП «НПО «Техномаш», Москва, Россия

Рассмотрены перспективы повышения точности многокоординатных машин с ЧПУ методами цифровой коррекции. Представлены достижения в создании средств калибровки 6D микронного уровня для многокоординатных машин с ЧПУ, которые являются предпосылкой для развития систем ЧПУ, путем встраивания в них постпроцессоров. Такие системы ЧПУ в сочетании с системами калибровки 6D, встраиваемыми в несущую систему машины, дают возможность реализовать в реальном масштабе времени полную коррекцию первичных отклонений подвижных узлов.

Введение

Точность выполнения технологических операций при изготовлении машины непосредственно определяет эффективность её работы при эксплуатации. Так, повышение точности обработки лопатки – переход с допуска на контур лопатки компрессора авиационного двигателя с 60 мкм на 12 мкм, достигнутое на фирме Rolls-Royce Limited за 23 года упорной работы, позволило повысить КПД компрессора авиационного двигателя на 15% [1].

Высокоточное производство и разработка новых инновационных прецизионных процессов и машин приобретает всё большее значение в последние десятилетия. Многие продукты с передовыми технологиями полностью зависят от одного или нескольких компонентов, которые производятся с допусками или размерами в диапазоне микро- или даже нанометрическом.

Научные сотрудники, конструкторы, инженеры и механики на протяжении всей истории машиностроения постоянно работали над повышением точности движения исполнительных органов машины, уменьшая случайную и функциональную составляющие. Методы воздействия на случайную и функциональную составляющие существенно различаются [2].

Все направления по повышению точности движения исполнительных органов машины разбиваются на две большие группы:

1) совершенствование конструкции несущей системы (НС) машины станка и технологии её изготовления,

2) совершенствование процесса управления машиной, включая методы цифровой коррекции.

Между этими направлениями постоянно идёт конкуренция и взаимопроникновение в зависимости от научных и технологических прорывов в машиностроении (конструкции, материалах, технологии изготовления). В частности, развитие средств измерения и средств вычислительной техники на прямую влияют на совершенствование и степень использования методов цифровой коррекции для повышения точности прецизионных многокоординатных машин с ЧПУ.

Успехи калибровки машин с ЧПУ

До настоящего времени использование методов цифровой коррекции шло через развитие методов калибровки машин и метода коррекции процессами коррекции в системе ЧПУ машины. Существенные успехи достигнуты в создании новых средств калибровки (измерения) первичных отклонений движения основных узлов.

На рис. 1 представлены прецизионные лазерные калибраторы, позволяющие измерять отклонения движения узла машины одновременно по 6 координатам (3 линейные: позиционирование, прямолинейность в двух плоскостях и 3 угловые: повороты вокруг 3 декартовых координат) с точностью на уровне 1 мкм.



Рис.1. Прецизионные лазерные калибраторы 6 D для измерения первичных отклонений

На рис.2 показан прецизионный калибратор ф. Эталон, позволяющий измерять интегральные

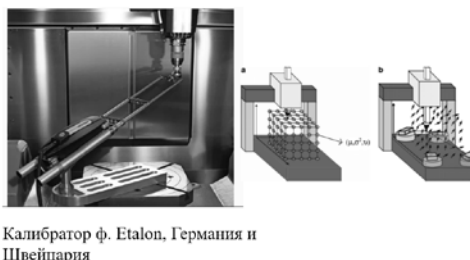


Рис.2. Прецизионные лазерные калибраторы для измерения интегральных отклонений (поле отклонений $d_i \{x_i, y_i, z_i\}$ «облако»)

отклонения ИО машины для коррекции по методу «корректирующей матрицы», запоминаемой в памяти системы ЧПУ машины. Метод «корректирующей матрицы» широко используется в системах управления КИМ и частично в системах ЧПУ станками как «объёмная» коррекция.

Применение современных калибровочных средств измерения и методов коррекции (метода коррекции первичных отклонений квазипараллельными процессами и метода «объёмной» коррекции) наряду с конструкторскими и технологическими мероприятиями позволило достигнуть микронной точности современных многоцелевых станков с ЧПУ. При этом допуск на случайную составляющую, как правило, равен половине допуска на общее отклонение нормируемого параметра.

Дальнейшее повышение точности рассмотренным подходом становится затруднительным. Поэтому в настоящее время интенсивно ведутся научно-исследовательские работы [3] по созданию средств одновременного измерения отклонений 6D (3 линейных и 3 угловых) при движении узла машины. Эти средства измерения уже могут быть встроены в конструкцию прецизионного технологического оборудования.

Встраивание СИ нанометрического уровня типа 6D дает возможность уменьшить как **случайную, так и функциональную** составляющую общего отклонения нормируемого параметра точности движения узла машины. Однако при этом необходимо будет решить следующие задачи управления.

Включение результатов измерения отклонений позиционирования в контур управления ИО хорошо изучена и решена. Значительно сложнее с другими отклонениями: 1) отклонениями прямолинейности в двух плоскостях, 2) отклонениями углов поворота вокруг осей X, Y, Z при линейном движении узла. Для компенсации этих отклонений необходимо использовать в реальном масштабе времени метод коррекции всех отклонений с использованием векторной (имитационной) модели образования интегрального отклонения (рис. 3) вектора $\mathbf{P}_{\text{ИД}} \mathbf{P}_{\text{ПД}}$ [2]. Вектор отклонения $\mathbf{P}_{\text{ИД}} \mathbf{P}_{\text{ПД}}$ раскладывается на 3 линейные компоненты, которые обрабатываются (корректируются) с помощью 3 линейных приводов X, Y, Z.

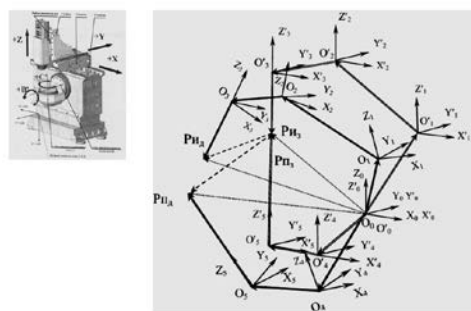


Рис.3. Схема образования интегрального отклонения $\mathbf{P}_{\text{ИД}} \mathbf{P}_{\text{ПД}}$

Интегральные угловые отклонения ИО получаются простым алгебраическим сложением и отрабатываются угловыми приводами. Следует отметить, что остается не решенной в настоящее время задача калибровки 6D узлов поворота.

Развитие метода полной коррекции первичных отклонений

Развитие средств вычислительной техники идет ускоренными темпами и в недалеком будущем вероятно откроется возможность решить указанную вычислительную задачу метода полной коррекции первичных отклонений в реальном масштабе времени в цикле интерполирования <2 мс [4].

В работе [5] было замечено, что постпроцессор в программном управлении многокоординатной машиной является специфической формой реализации математической (векторной) модели решения обратной задачи – вычисления управляющих сигналов (управляющей программы) для машины с заданной кинематической схемой и заданными размерами («геометрией») звеньев.

Можно предположить, что развитие средств вычислительной техники в недалеком будущем позволит размещать постпроцессор непосредственно в системе ЧПУ станка. В этом случае реализация задачи полной коррекции в соответствии с векторной математической моделью значительно упрощается и может быть реализуема через коррекцию «геометрии» кинематической модели машины (размеры звеньев и их расположение в пространстве).

На рис. 4 представлена схема потоков данных при изготовлении деталей с расширенной системой ЧПУ в соответствии с рассмотренной методикой повышения точности многокоординатной машины.

Работа выполнена по плану бюджетных работ ИМАШ РАН

1. McKeown P.A. The role of Precision Engineering in Manufacturing of the Future. Annals of the CIRP; Keynote; Vol. 36/2; 1987.
2. Серков Н.А. Точность многокоординатных машин с ЧПУ: Теоретические и экспериментальные основы. -М.: ЛЕНАНД, 2015. - 304 с.
3. Liu C-S, Zeng J-Y, Chen Y-T. Development of positioning error measurement system based on geometric optics for long linear stage // Int J Adv Manuf Technol (2021) 115:2595–2606.
4. Schwenke H., Knapp W., Haitjema H., Weckenmann A., Schmitt R., Delbressine F. Geometric error measurement and compensation of machines // CIRP Annals / Manufacturing Technology. 2008. V. 57. № 2. P. 660-675.
5. Пась О.В. и Серков Н.А. Повышение точности движения по траектории путем коррекции управляющей программы по результатам калибровки многокоординатной машины с чпу // В сборнике: XXXI Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения (МИКМУС - 2019). Сборник трудов конференции. 2020. С. 506-509.

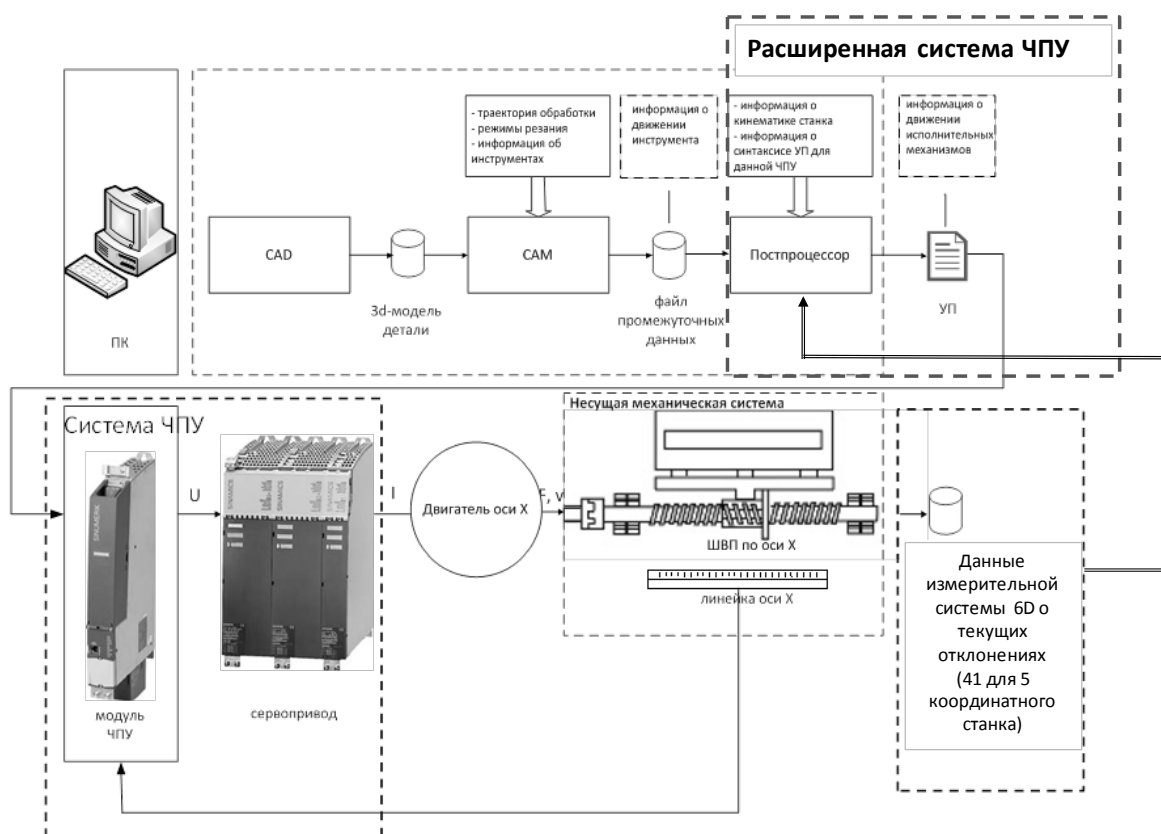


Рис. 4. Схема потоков данных при изготовлении деталей с расширенной системой ЧПУ в соответствии с рассмотренной методикой повышения точности многокоординатной машины

КОНТРОЛЬ ВИБРАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В УСЛОВИЯХ ПРОЯВЛЕНИЯ РЕЗОНАНСНЫХ ПРОЦЕССОВ

О.Б. Скворцов^{1,2}

¹Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; oleg.b.skvorcov@gmail.com

²Научно-технический центр «Завод балансировочных машин», Москва, Россия

Рассмотрено влияние резонансных процессов на результаты мониторинга вибрационного состояния машин и механизмов. Наличие высокочастотных резонансов в элементах конструкции приводит к влиянию связанной с ними вибрации на результаты измерения низкочастотных составляющих, например оборотной вибрации. Отмечен вклад ударных процессов в возбуждение вибрации на резонансных частотах, вносящей дополнительную погрешность при оценке параметров вибрационных составляющих.

Введение

Мониторинг мощного энергетического оборудования является в настоящее время обязательным для решения задач противоаварийной защиты, диагностики, прогнозирования и [1]. При контроле состояния такого оборудования необходим контроль общего уровня и отдельных частотных компонент вибрации. В элементах оборудования таких как зубчатые передачи или подшипники качения частотный спектр может быть необходимо рассматривать частоты превышающие оборотные в 400-500 раз [2]. Диагностирование и устранение такого распространенного дефекта как нарушение балансировки роторных узлов требует точного контроля амплитуды и фазы вибрации на оборотной частоте [3]. Оценка вибрации в широкой полосе частот в присутствии аддитивных случайных шумов и помех, а также несинхронизированных с оборотной вибрацией широкополосных вибраций вызывает необходимость оценки возможного влияния последних на результаты [4-7]. Влияние широкополосной вибрации в виде затухающих гармонических колебательных процессов значительной амплитуды связано с ударными процессами между элементами зубчатых передач или подшипниковых элементов качения. Другая причина влияния таких процессов связано с рывками, передаваемыми на роторный узел от приводов, а также импульсным питанием таких приводов. Влияние этих процессов определяется их значительной амплитудой из-за возбуждения колебаний на частотах механических резонансов элементов конструкции. Влияние на результаты измерения может существенно различаться в зависимости от выбора в качестве контролируемого параметра ускорения, скорости или перемещения вибрации.

Методика исследования

При исследовании вибрации сложного роторного оборудования приходится работать с сигналами представляющими аддитивные смеси нескольких составляющих g , каждая из которых может быть близка к простому гармоническому сигналу. Можно рассмотреть сумму нескольких таких сигналов, например двух. Аддитивный вибрационный сигнал может быть представлен как сигнал перемещений $d(t)$ или ускорений $a(t)$.

и

$$d(t) = D_1 \cdot \sin(2\pi f_1 t) + D_2 \cdot \sin(2\pi f_2 t) , \quad (1)$$

$$a(t) = A_1 \cdot \sin(2\pi f_1 t) + A_2 \cdot \sin(2\pi f_2 t) . \quad (2)$$

Представления в виде ускорения и перемещения связаны соотношением

$$d(t) = \iint a(t) dt . \quad (3)$$

На рис. 1 представлен внешний вид внешнего вид вибрационных сигналов перемещения и ускорения двухчастотного гармонического типа.

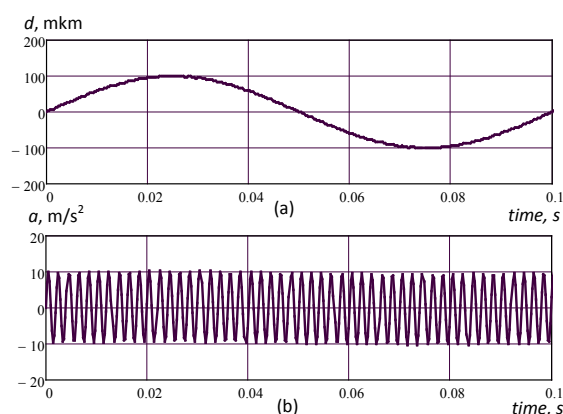


Рис. 1. Сигналы двухчастотного вибрационного перемещения (а) и вибрационного ускорения (б) для $D_1=100$ мкм, $f_1=10$ Гц, $D_2=1$ мкм и $f_2=500$ Гц.

Представление в виде ускорения приводит к практически полному подавлению вклада низкочастотной компоненты, а представление в виде перемещения не позволяет рассматривать вклад высокочастотной компоненты вибрации.

Представляет интерес оценить особенности влияния высокочастотных составляющих вибрации на результаты ее измерения.

Обсуждение

Влияние высокочастотных вибраций на результаты измерения существенно увеличивается при наличии резонансов в контролируемой конструкции. Возбуждение вибрационных процессов часто связано с действием различного рода ударов. Ударные процессы характеризуются широким спектральным составом, отдельные частоты которого совпадают с

резонансами, вызывая вибрацию на этих частотах. Кроме резонанса конструктивных элементов, самим датчикам вибрации (акселерометрам) также присуще влияние собственных резонансов. Аддитивные сигналы в этом случае также могут представлять затухающие колебания. Пример сигнала с акселерометра в этом случае представлен на рис. 2.

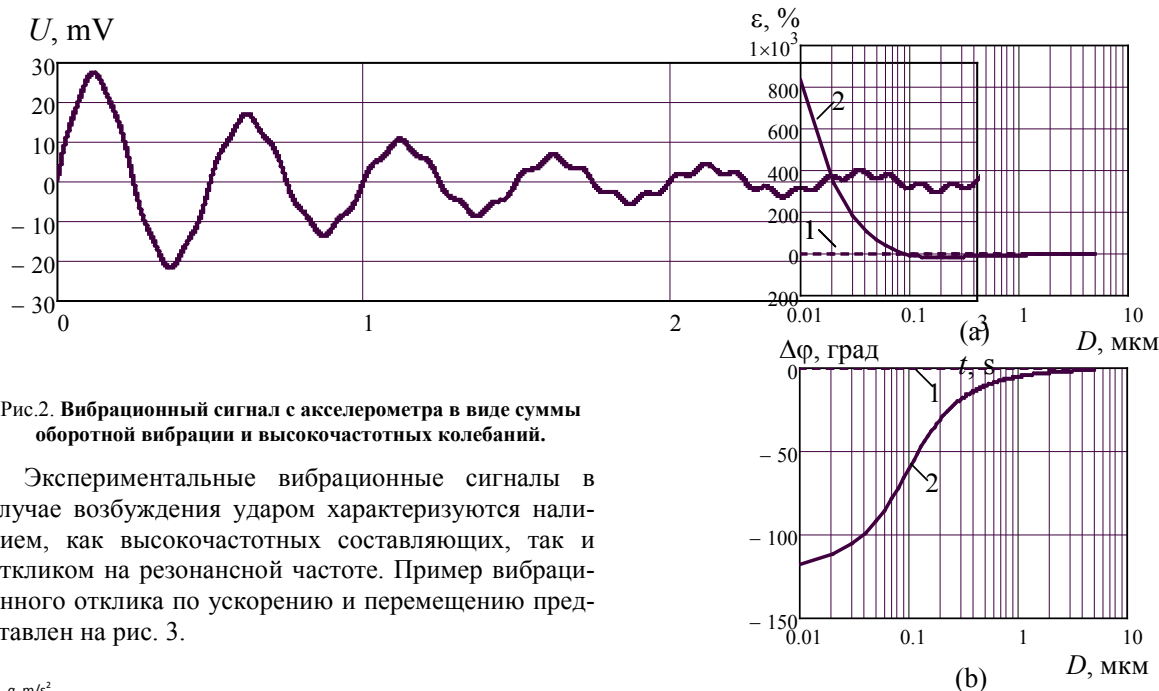


Рис.2. Вибрационный сигнал с акселерометра в виде суммы оборотной вибрации и высокочастотных колебаний.

Экспериментальные вибрационные сигналы в случае возбуждения ударом характеризуются наличием, как высокочастотных составляющих, так и откликом на резонансной частоте. Пример вибрационного отклика по ускорению и перемещению представлен на рис. 3.

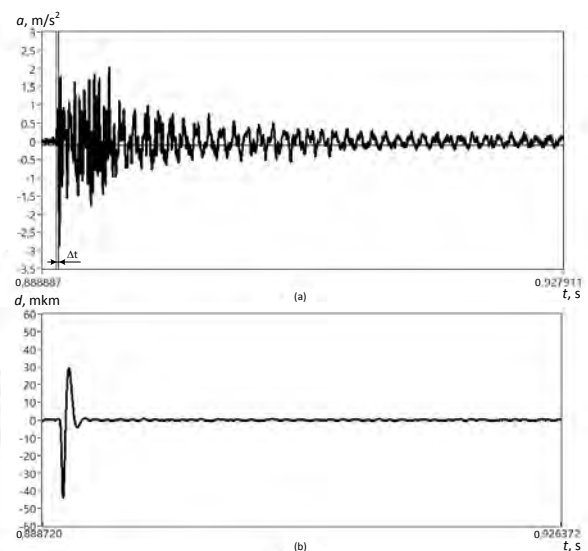


Рис. 3. Вибрационный отклик по ускорению (а) и перемещению (б) на ударное воздействие. Круглый стержень, закрепленный на концах

Сравнение сигналов на рис. 3 показывает, что сигнал ускорения существенно сложнее, чем сигнал перемещения в котором подавлено влияние высокочастотных составляющих. Представляет интерес оценить влияние высокочастотных составляющих на результаты оценки низкочастотных составляющих, например оборотной частоты. Моделирование про-

цесса измерения показывает, что для реальных сигналов такое влияние имеется и его можно оценить [8]. На рис. 4 приведены относительная погрешность оценки амплитуды и абсолютная погрешность оценки фазы оборотной вибрации в зависимости от ее амплитуды для рассматриваемого случая.

Рис. 4. Относительные погрешности оценок амплитуды (а) и абсолютные погрешности оценок фазы (б) оборотной вибрации от амплитуды этой составляющей при отсутствии (1) и наличии (2) аддитивных затухающих колебаний на частоте резонанса при проведении измерений в зарезонансном режиме вибрации роторного агрегата

Заключение.

В работе дано обоснование использования для вибрационного мониторинга данных о вибрационном ускорении. Оценки по ускорению учитывают вклад высокочастотных составляющих и более близки к результатам оценок вибрационного состояния оборудования по критериям вибронагружения, виброперегрузки, а также индекса динамического отклика. На результаты контроля низкочастотной оборотной вибрации и других дискретных частотных составляющих может оказывать существенное влияние несинхронизированные вибрации на резонансных частотах, вызываемые процессами ударного взаимодействия элементов контролируемого узла.

1. Skvortcov O.B. and Pravotorova E.A. Vibration monitoring systems for power equipment as an analogue of an artificial neural network // *Advances in Intelligent Systems, Computer Science and Digital Economics*. Springer. 2020. – P.145–153.
2. Skvortcov O.B. Selection of vibration norms and systems structures when designing means of monitoring units with gear transmissions // *New Approaches to Gear Design and Production*. Springer. 2020. – P. 495–511

3. Радчик И.И., Сковцов О.Б., Сушко А.Е., Арестов С.О., Якутин К.К., Гвоздева Л.А., Сковцова В.Б., Балицкая Т.В. Устройство для измерения дисбаланса роторов // Патент RU 2643170, кл. G01M 1/22, БИ № 4 31.01.2018, 18 с.
4. Сковцов О.Б. Контроль оборотной вибрации // Российская научно-техническая конференция с международным участием. Инновационные технологии в электронике и приборостроении [Электронный ресурс]: Сборник докладов конференции «Инновационные технологии в электронике и приборостроении» Физико-технологического института РТУ МИРЭА. — М.: РТУ МИРЭА, 2020. — Т. 2. — С. 301–305.
5. Skvortsov O. Condition monitoring systems and vibration fatigue // Book of abstracts. Proceedings of the. First Virtual Conference on Mechanical Fatigue. 9-11 September 2020. — P. 79–80.
6. Сковцов О.Б. Мониторинг оборотной вибрации роторного оборудования // Шестой междисциплинарный научный форум с международным участием «Новые материалы и перспективные технологии», М.: 23-27 ноября 2020. Сборник материалов, Т.1. АНО ЦНТР, 2020. — С.977–982.
7. Сковцов О.Б. Организация прогнозирования состояния и противоаварийной защиты конструктивных элементов энергетического оборудования // Пятый междисциплинарный научный форум с международным участием «Новые материалы и перспективные технологии», Том 1. М.: ООО «БУКИ и ВЕДИ». 2019. — С. 390–394.
8. Сковцов О.Б. Влияние резонансных процессов на оценку параметров оборотной вибрации роторных узлов // Российская научно-техническая конференция с международным участием. [Электронный ресурс]: Сборник докладов конференции «Инновационные технологии в электронике и приборостроении» Физико-технологического института РТУ МИРЭА, Том 1. — М.: РТУ МИРЭА, 2021. С. 444–449.

ОЦЕНКА АДГЕЗИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕТОДОМ ЗАЛИПШЕГО КАНТИЛЕВЕРА: АНАЛИЗ ФАКТОРА ПОВЕРХНОСТНОЙ ШЕРОХОВАТОСТИ

И.А. Солдатенков¹, Т.И. Муравьева¹, Ф.И. Степанов¹, В.Б. Световой²

¹Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия; iasoldat@hotmail.com

²Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, Москва, Россия

Обусловленные квантовыми флуктуациями электромагнитного поля, дисперсионные силы играют важную роль в производстве и функционировании современных микро/нанoeлектромеханических систем. Эффективным средством контроля и измерения дисперсионных сил является метод залипшего кантилевера. Однако на точность измерений этим методом существенное влияние оказывает шероховатость исследуемой поверхности, которая вносит неопределенность в оценку контактного зазора на участке залипания кантилевера. В докладе описывается теоретико-экспериментальный подход, позволяющий получить такую оценку, исходя из данных по измерению энергии адгезии.

Введение

Адгезионное взаимодействие тел обуславливается силами различной природы (электростатической, капиллярной, химической и др.), среди которых выделяются дисперсионные силы (ДС). Эти силы действуют между незаряженными телами и их существование связано с квантовыми флуктуациями электромагнитного поля [1]. На расстояниях между телами $h \sim 1$ нм ДС носят название ван-дер-ваальсовых сил, при больших расстояниях ($h \sim 10$ нм), когда существенным становится запаздывание электромагнитных волн, они называются силами Казимира [2]. С увеличением расстояния h ДС быстро убывают ($\sim h^{-\alpha}$, $\alpha = 3 \div 4$). Однако, несмотря на это, ДС играют важную роль в производстве и функционировании современных микро/нанoeлектромеханических систем (MEMS/NEMS), т.к. они являются причиной крайне нежелательного явления – адгезионного залипания подвижных элементов подобных систем. Ситуация усугубляется еще тем, что, в отличие от многих других сил, ДС не могут быть устранены выбором материалов, модификацией поверхности, внешними условиями.

Указанные выше обстоятельства обуславливают необходимость измерения и контроля ДС на расстояниях $h \sim 10$ нм. Использование традиционных систем с упругим подвесом для этого представляется проблематичным из-за потери устойчивости на таких расстояниях. Предложенный ранее метод залипшего кантилевера лишен подобного недостатка и может быть использован как для измерения энергии адгезии [3], так и для измерения ДС [4]. Ниже рассматриваются некоторые аспекты использования данного метода, связанные с наличием поверхностной шероховатости контактирующих тел.

Метод залипшего кантилевера

Данный метод предполагает использование упругой балки (кантилевера), один конец которой закреплен на высоте H над подложкой (рис. 1). Для исследования различных материалов на подложку наносятся тонкие покрытия, шероховатость которых измеряется с помощью атомно-силового микроскопа

(АСМ). Кантилеверы являются элементами кремниевых чипов и изготавливаются с применением микротехнологий. Характерная длина и толщина кантилевера составляют $L \sim 10$ мм и $t \sim 10$ мкм, высота крепления кантилевера $H \sim 10$ мкм.



Рис. 1. Схема метода залипшего кантилевера

Под действием близкодействующих ДС (~ 1 нм) часть кантилевера, прилегающая к его незакрепленному концу, оказывается сцепленной с подложкой, образуя участок залипания. Остальная (свободная) часть кантилевера также находится под действием ДС, которые вызывают изменение прогиба кантилевера относительно значений, отвечающих классической теории изгиба балки. Как показывают оценки, подобное изменение составляет ~ 100 нм. Оно может быть измерено при помощи сканирующего интерферометра с точностью ~ 1 нм и служит в качестве исходных данных для оценки ДС.

При указанной точности измерения (~ 1 нм) прогиба кантилевера существенным становится учет контактного зазора h_0 на участке залипания, обусловленного шероховатостью подложки. Для определения величины h_0 нами предлагается использовать энергию адгезии Γ , которую можно оценить по классической формуле [5]

$$\Gamma = \frac{3Et^3H^2}{2s^4}, \quad (1)$$

где E – модуль упругости кантилевера, s – длина свободной части кантилевера (рис. 1), которая измеряется в эксперименте. Формула (1) получается путем нахождения минимума полной энергии упругого кантилевера при наличии участка залипания, харак-

теризуемого энергией адгезии Γ . С другой стороны, адгезионное взаимодействие кантилевера и подложки обуславливается наличием ДС и шероховатости подложки, что, в свою очередь, приводит к зависимости величины Γ от контактного зазора h_0 [6]. Подобная зависимость, вид которой будет установлен ниже, позволяет по известной энергии адгезии Γ определить искомое значение h_0 .

Специфика шероховатости исследуемых поверхностей

Стандартная технология производства микро-/нанoeлектромеханических систем предполагает использование тонких покрытий, для получения которых применяются известные способы – магнетронное напыление, термическое осаждение и др. Как показывают эксперименты [7, 8], получаемая в результате шероховатость покрытия описывается негауссовым распределением и характеризуется значительным числом неровностей (пиков), которые имеют высоту ~ 10 нм, существенно превышающую среднеквадратичное отклонение шероховатости $w \sim 1$ нм (рис. 2, 3).

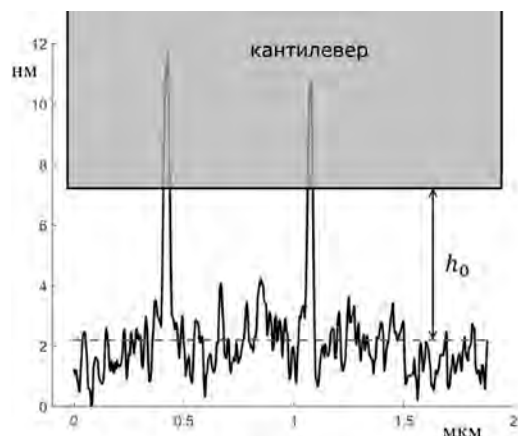


Рис. 2. Профиль шероховатости Pt покрытия толщиной 200 нм, $w=1$ нм

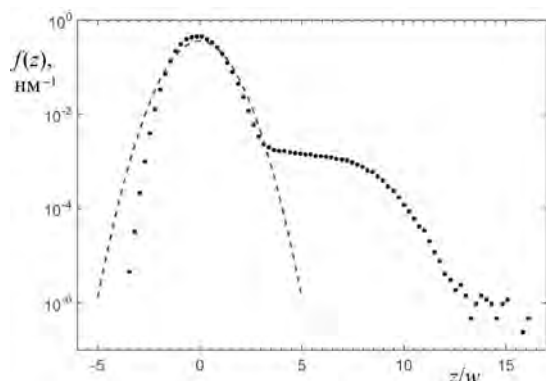


Рис. 3. Функция плотности вероятности $f(z)$ высот шероховатости Pt покрытия (толщина 200 нм, $w=1$ нм), полученная из АСМ сканов поверхности по площади 20×20 мкм с разрешением 4096 пикселей на линию. Штриховая кривая соответствует нормальному распределению с таким же среднеквадратичным отклонением w

Подобная особенность шероховатости существенным образом влияет на величину контактного зазора h_0 на участке залипания кантилевера (рис. 1). Действительно, ввиду отсутствия внешней нагрузки, контакт кантилевера и подложки происходит в основном по вышеупомянутым пикам, при этом остальная шероховатость в прямой контакт с кантилевером не вступает и взаимодействует с ним посредством ДС (рис. 2). Данное обстоятельство будет учитываться ниже при построении модели шероховатого контакта.

Стержневая модель шероховатого контакта

Рассмотрим упрощенную модель шероховатого контакта кантилевера и подложки на участке залипания (рис. 4), которая будет использоваться для расчета контактного зазора h_0 . А именно, будем считать поверхность кантилевера гладкой и жесткой, а шероховатость подложки представим в виде набора стержней (неровностей) одинакового сечения, высоты z_i которых относительно средней плоскости описываются функцией плотности вероятности $f(z)$ [9]. Положение кантилевера относительно подложки задается расстоянием h между его поверхностью и средней плоскостью шероховатости, причем в состоянии равновесия величина h совпадает с искомым контактным зазором h_0 .



Рис. 4. Модель контакта кантилевера и шероховатой подложки. Знаком «+» помечены неровности, находящиеся в состоянии пластического течения

Контактное давление p кантилевера на неровности обуславливается действием ДС и может быть найдено по формуле, учитывающей отталкивание на малых расстояниях за счет перекрытия электронных облаков:

$$p = P(h) = P_{Lif}(h) \left[1 - (h_c / h)^6 \right].$$

Здесь h – контактный зазор для отдельной неровности, h_c – равновесный зазор, функция $P_{Lif}(h)$ рассчитывается с использованием теории Лифшица [1]. Считается, что неровность деформируется идеально пластически, если контактное давление на него превышает предел текучести σ_f . Соответствующий контактный зазор h_{0c} обеспечивает баланс

между напряжением σ_f пластического течения и короткодействующими ДС (самосогласованный по Дерягину подход), так что имеет место соотношение

$$\sigma_f = P(h_{0c}).$$

Сделанные выше допущения позволяют рассчитать внешнюю силу, действующую на единицу поверхности кантилевера при его сближении с подложкой до равновесного расстояния h_0 :

$$\Pi_{tot}^+(h) = \int_{-\infty}^{h_p} P(h-z)f(z)dz - \sigma_f R(h), \quad (2)$$

и такую же силу при отводе кантилевера от равновесного расстояния h_0 :

$$\Pi_{tot}^-(h) = \int_{-\infty}^{h_{0p}} P(h-z)f(z)dz + P(h-h_{0p})R(h_0). \quad (3)$$

Здесь $h_p = h - h_{0c}$, $h_{0p} = h_0 - h_{0c}$, а функция

$$R(h) = \int_{h_p}^{\infty} f(z)dz$$

определяет относительную площадь контакта.

Располагая формулой (3), можно найти работу внешней силы по отводу кантилевера на бесконечность, т.е. энергию адгезии Γ :

$$\Gamma = \int_{-\infty}^{h_{0p}} W(h_0 - z)f(z)dz + W(h_{0c})R(h_0), \quad (4)$$

причем

$$W(h) = \int_h^{\infty} P(X)dX.$$

– энергия ДС для плоских поверхностей, разделенных зазором h .

Правая часть равенства (4) зависит от величины h_0 , поэтому это равенство определяет искомую зависимость $\Gamma(h_0)$, позволяющую, как было указано выше, найти h_0 по измеренной энергии адгезии.

Замечание. В состоянии равновесия $\Pi_{tot}^+(h_0) = 0$, поэтому равенство (2) также позволяет получить уравнение для величины h_0 . Однако, в это уравнение входит предел текучести σ_f , значение которого определяется с большой погрешностью. В связи с этим более предпочтительным для нахождения величины h_0 является уравнение (4), содержащее энергию адгезии Γ , надежно определяемую экспериментально.

Пример. Рассматривался контакт шероховатого покрытия платины (рис. 3) и гладкого кантилевера из кремния. Соответствующая энергия адгезии составляет $\Gamma = 38.9$ мкДж/м², при точности измерения 2.5%. В результате расчетов было получено значение $h_0 = 12.0$ нм точностью 0.1 нм, чего вполне достаточно для измерения ДС на расстояниях ~ 10 нм.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 20-19-00214).

1. Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П. Статистическая физика. Часть 2. М.: Наука, 1978 г. 447 с.
2. Casimir H.B.G. On the attraction between two perfectly conducting plates // Proc. Kon. Nederland. Akad. Wetensch. B51. 1948. V.51. P. 793—795.
3. Maboudian R., Howe R.T. Critical review: Adhesion in surface micromechanical structures // J. Vacuum Sci. Technol. B. 1997. V.15. No 1. P.1—20.
4. Svetovoy V.B., Postnikov A.V., Uvarov I.V., Stepanov F.I., Palasantzas G. Measuring the dispersion forces near the van der Waals–Casimir transition // Phys. Rev. Appl. 2020. V.13. 064057.
5. De Boer M.P., Michalske T.A. Accurate method for determining adhesion of cantilever beams // J. Appl. Phys. 1999. V.86. P.817—827.
6. Soldatenkov I.A., Palasantzas G., Svetovoy V. B. Weak adhesion between deposited rough films: Relation to dispersion forces // Phys. Rev. B. 2021. V.104. L121404.
7. Zwol P.J., Svetovoy V.B., Palasantzas G. Distance upon contact: Determination from roughness profile // Phys. Rev. B. 2009. V.80. 235401.
8. Muravyeva T.I., Uvarov I.V., Naumov V. V., Palasantzas G., Svetovoy V.B. Excessive number of high asperities for sputtered rough films // Phys. Rev. B. 2021. V.104. 035415.
9. Крагельский И. В. Добычин М. Н., Комбалов В. С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение. 1977. 528 с.

МЕХАТРОННЫЙ МОДУЛЬ УПРАВЛЕНИЯ АДАПТИВНЫМ ТОРМОЖЕНИЕМ ЭЛЕКТРОВОЗА

А.А. Солятов, В.С. Сидоренко

Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия artyom.solyatov@yandex.ru

Ключевые слова: Электровоз, повышение эффективности тормозов, пневматическая тормозная система, зарядка магистральной, время подготовки к действию, торможение локомотива, регулируемое торможение.

Цель

Цель работы – Повышение надёжности оборудования и безопасности процесса торможения, путем создания адаптивной тормозной системы ограничивающие нарушение сцепления колеса с дорогой.

Введение

Железнодорожный транспорт занимает особое место в развитии инфраструктуры государства и его экономики. Значительная часть всего грузооборота приходится на этот вид транспорта. Принципиально новые технические решения при проектировании отдельных элементов и систем составляют перспективное направление создания транспортных средств будущего. [1]

Высокая эффективность тормозов является одним из важнейших условий обеспечения безопасности движения при увеличении скоростей и массы поездов. Организация эффективного и безопасного перевозочного процесса невозможна без надежной работы пневматических тормозных систем локомотивов.

Постановка задачи

После анализа существующих решений, уровня и глубины их исследований предложен принцип создания перспективных тормозных пневматических систем.

Предпочтение отдаётся аппаратам управления процессом торможения, которые могут обеспечить качественно регулируемый процесс создания усилия торможения, на базе мехатронного управления.

В таком случае стоит принимать во внимание регулирующие усилие аппараты, осуществляющие не только релейное управление, но и осуществляющие процесс управления согласно задаваемым законам.

Целиком решаемой задаче будет отвечать наличие программного управление регулируемым усилием. Замена используемых управляющих аппаратов на мехатронные модули управления позволит упростить схему, а так же автоматизировать тормозные пневматические системы, которая будет адаптироваться к различным условиям, что позволит существенно повысить их эффективность.

Исходя из этого подготовлены основные принципы построения схмотехнических решений тормозных систем с улучшенными динамическими и энергетическими характеристиками:

- Оптимизация процесса торможения изменением схмотехнических компоновок пневматической схемы;

- Адаптация динамической тормозной системы к изменяющимся скоростным и нагрузочным характеристикам локомотива;

- Минимизация элементов.

Описание конструкции и работы мехатронного модуля в составе пневматической системы

Приведённые положения рассмотрим к обобщенной структурной схеме предлагаемой пневматической тормозной системы. Схема показывает состав и взаимосвязи элементов. Механическая подсистема передает усилие от штока тормозного цилиндра через рычажный механизм затормаживаемому колесу.

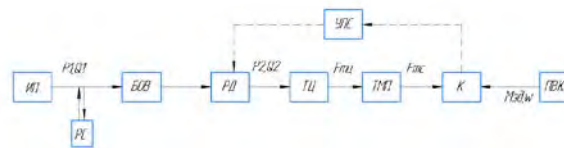


Рисунок 1. Обобщенная структурная схема пневматической тормозной системы.

ИП – источник питания; РС – ресивер; БОВ – блок отчистки воздуха; РД – регулятор давления; ТЦ – тормозной цилиндр; ТМП – тормозная механическая подсистема; К – колесо; УПС – управляющая подсистема ПВК – привод вращения колеса.

Пневматическая подсистема включает источник питания, ресивер, блок подготовки воздуха, регулятор давления, тормозной цилиндр и формирует параметры потока сжатого газа P1, P2, Q1, Q2, преобразует его энергию в движение выходного звена пневмоцилиндра с заданным усилием Fтц.

Управляющая подсистема обеспечивает алгоритм пропорционального управления давлением системы в автономном режиме. Параметры и время управляющих воздействий обеспечивают автономный датчик, регулятор давления пневматически связанный с тормозным цилиндром.

Указанные устройства объединяются пневматическими линиями связи в единый контур пневматического управления тормозной системы. Его отличие от используемых в том, что все режимы торможения обеспечивает одно устройство на базе мехатронного модуля регулятора давления и короткой неразветвленной пневматической системе связи. Это позволяет существенно повысить быстродействие и стабильность срабатывания тормозной системы.

Алгоритм управления мехатронным модулем

Управление процессом формирования тормозного усилия пневматической тормозной адаптивной системы имеет определённые трудности, поскольку из-за свойств сжимаемости воздуха и влияния противодействующих сил пневмопривод имеет не линейную характеристику. Однако, такие приводы имеют преимущество перед аналогичными приводами.

Для управления производительностью пневматической системы можно использовать широкий спектр регуляторов, которые варьируются от простых моделей линейных регуляторов до моделей современных нелинейных регуляторов. Выбор метода управления является очень важным фактором в тормозных пневматических системах, который зависит от целей проектирования и использования.[2]

Для нивелирования обозначенных проблем требуется использовать зарекомендовавшие себя методы адаптивного управления, показавшие свои возможности в управлении и взаимодействии с физическими системами в реальном времени. Для адаптивного регулирования процессов торможения необходим программируемый логический контроллер, позволяющий считывать, анализировать поступающие внешние сигналы и в последствии регулировать параметры системы. Важным фактором в конструировании пропорционального пневмопривода на этапе проектирования системы управления является подбор способа управления. В современных пропорциональных системах популярным способом является программирование контроллера на языке функциональных блок-диаграмм FBD.

В следствии выше перечисленного, рационально использовать адаптивный способ регулирования, в который входят алгоритмы автоматического регулирования, исходя от внешних воздействий. Основная задача адаптивного регулирования заключается в управлении давлением, формирующего тормозное усилие с максимально возможным быстродействием. Типовая схема алгоритма управления приведена на «рис. 2». В этом блочном управлении оператор оценивает погодные условия и вводит необходимый режим (блоки P1,P2,P3), после чего система запоминает выбранный режим и самостоятельно из памяти берёт значение которое в момент торможения необходимо подвести к регулятору. Затем по ходу движения локомотива система опрашивает значения датчиков, а именно датчик скорости колеса (ДСК) и датчик скорости поезда (ДСП). Приняв их показатели программа начинает сравнивать приходящие с них данные. Таким образом, сравнение происходит последовательно в трёх блоках ($ДСК=ДСП$; $ДСК>ДСП$; $ДСК<ДСП$;). Переход от одного блока сравнения к другому происходит в случае если в ходе сравнения не было получено значение ИСТИНА.

В случае если скорость колеса равна скорости поезда и от оператора поступил сигнал о начале торможения, контроллер берёт из памяти сохранённое значение для ранее выбранного режима и подаёт

сигнал на регулятор, регулятор формирует давление выбранного режима и пускает его в тормозной цилиндр.

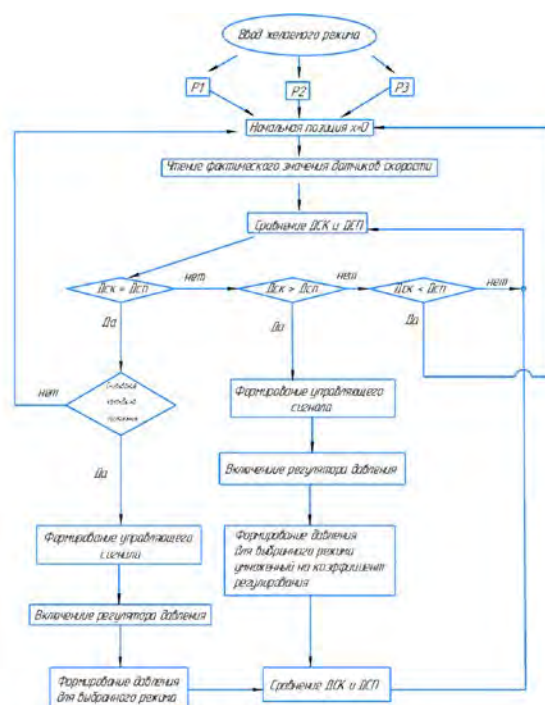


Рисунок 2 – Алгоритм управления системой торможения.

В случае если скорость колеса равна скорости поезда система самостоятельно, без участия оператора, формирует сигнал на начало торможения, контроллер берёт из памяти значение режима и домножает его на усиливающий коэффициент. Так происходит потому что когда скорость колеса превышает скорость поезда это сигнализирует о начале юза, т.е. прокручивания колеса, которое необходимо остановить вне зависимости от того происходит торможение или нет.

Тогда когда скорость колеса падает ниже скорости поезда говорит о том что колесо застопорилось в процессе торможения и в этом случае необходимо отпустить тормоза и вернуть шток в первоначальное положение. После чего алгоритм возвращается к опросу датчиков.

Теоретические исследования процесса работы мехатронного модуля

В процессе работы пневмомеханической тормозной системы с адаптивным управлением, нужно обеспечить срабатывание тормозов при команде оператора либо при проскальзывании колеса. Для того чтобы обеспечить торможение в необходимый момент используется пропорциональные регулятор давления, который контролируется программируемым логическим контроллером считывающим и обрабатывающим приходящие данные с датчиков.

В следствии предложена обобщённая математическая модель состоящая из нелинейных диффе-

ренциальных уравнений, описывающих изменение параметров системы.

Модель локомотива описывается следующей системой уравнений.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dL}{dt} = V \\ M_{пр} \cdot \frac{dV}{dt} = p_1 \cdot S_1 - p_2 \cdot S_2 - F_{вт1} - F_{сг1} - \alpha \cdot F_{тз} \\ \frac{dp_{пнц}}{dt} = \frac{k \cdot \mu \cdot f \cdot K \cdot p_H \cdot \sqrt{R \cdot T_H} \cdot \varphi(\alpha)}{S_{пнц} \cdot (y_{01} + y)} - \frac{k \cdot p_{пнц}}{E \cdot (y_{01} + y)} \cdot \frac{dy}{dt} - \\ \frac{k \cdot R \cdot T_H}{S_{пнц} \cdot (y_{01} + y)} \cdot k_n \cdot (p_H \cdot \alpha_2 - p_{пнц}) \cdot \text{sign}(p_H \cdot \alpha_2 - p_{пнц}) \\ J_k \frac{d\omega_k}{dt} = M_{дв} - M_{сц} - M_T \\ m \frac{dv_k}{dt} = F_x - F_d - mg \cdot \sin \beta, \end{array} \right. \quad (1)$$

Сложив выведенные зависимости, можно представить систему уравнений, описывающая процесс движения электровоза.

Система дифференциальных уравнений может решаться различными численными методами при заданных начальных условиях, параметрах привода и управляющих воздействиях. [3] Исследование модели системы нелинейных дифференциальных уравнений выполнено с использованием системы компьютерного моделирования *matlabsimulink* численными методами Рунге-Кутты. Главной характеристикой тормозного пневмопривода является то, что объект управления не зависит от управления оператора должен срабатывать во время блокировки и проскальзывания колеса. В таком приводе дискретные датчики выдают сигнал, подлежащий обработке и сравнению в ПЛК. Устройством управления является пропорциональный регулятор давления, который осуществляет включение или выключение исполнительного движения, или изменение усилия на основе полученных в результате анализа сигналов.

Для наблюдения были взяты этапы движения электровоза на стадиях торможения «рис. 3» и разгона «рис. 4». На представленных осциллограммах можно видеть как срабатывает заданный алгоритм во время пересечения скорости вращения колеса заданной границы разности скоростей, что предотвращает блокировку колеса на этапе торможения и проскальзывания на этапе разгона. Полученные результаты подтверждают функциональные возможности предлагаемого привода и позволяют оценить процессы, протекающие при движении локомотива и работе проектируемого пневмомеханического привода. Полученная модель привода позволяет проводить вычислительный эксперимент при различных внешних условиях, то есть при различных коэффициентах сцепления колеса с рельсом.

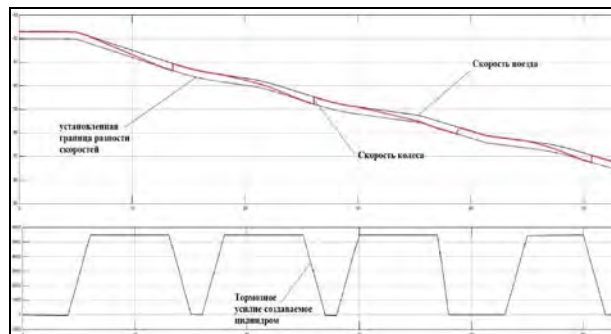


Рисунок 3 – Осциллограмма зависимости скорости локомотива, скорости колеса и тормозного усилия при торможении

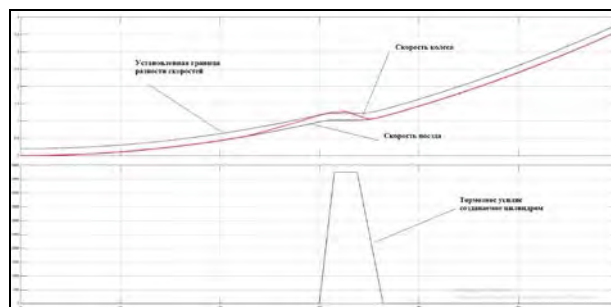


Рисунок 4 – Осциллограмма зависимости скорости локомотива, скорости колеса и тормозного усилия при разгоне

Заключение

В результате выполненного исследования предложено техническое решение и разработана обобщённая математическая модель. Предварительные экспериментальные исследования подтверждают адекватность модели.

Предложенный алгоритм и программная поддержка позволяют развить технику исполнения с подключением системы пескоподдачи, для повышения качества контроля и уменьшения времени процесса торможения.

1. Иноземцев, В.Г. Тормоза железнодорожного подвижного состава / В.Г. Иноземцев. - М.: Транспорт, 1979.
2. Аль Груби В.Е.А.Л. Адаптивные электропневматические модули мехатронных систем управления технологическим оборудованием и роботами с пневмоприводом диссертация кандидата технических наук : 05.02.05 Новочеркасск 2017.
3. Сидоренко В.С. Синтез гидромеханических позиционирующих устройств металлообрабатывающего оборудования. диссертация доктора технических наук : 05.03.01 Ростов-на-Дону 2001

ПЛАНИРУЕМЫЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ В ЗАДАЧАХ ИССЛЕДОВАНИЯ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ

И.Н. Статников, Г.И. Фирсов

Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; firsovgi@mail.ru

Приведены результаты вычислительных экспериментальных исследований динамики переходных процессов движения и фиксации поворотного делительного стола с гидромеханическим приводом. Оценены основные критерии работоспособного состояния механизмов, включающих быстроходность и значение погрешности фиксации.

В современных машинах и приборах за последние годы получили широкое применение такие мехатронные устройства, как поворотные делительные столы с гидромеханическим приводом. Их быстроходность и точность в значительной степени определяют производительность и точность машин. Типовая схема стола включает гидропривод с реверсируемым гидромотором и электрогидравлическими устройствами для осуществления управления гидроприводом, передаточный механизм с самотормозящейся червячной передачей, фиксируемый узел, подвижный фиксатор и упоры. В этих столах предусмотрена возможность изменения при эксплуатации ряда основных параметров с целью обеспечения высокой стабильности фиксации.

Механизмы делительного стола работают в циклическом режиме. После поворота планшайбы на угол, равный $\psi = \psi_{\text{пов}} + \psi_{\text{о.х.}}$, где $\psi_{\text{пов}}$ - угол между смежными позициями (упорами), $\psi_{\text{о.х.}}$ - угол обратного хода (перебег), происходит остановка гидромотора, а затем вращение его в обратном направлении на величину перебега $\psi_{\text{о.х.}}$.

При поджиге жесткого упора планшайбы к фиксирующей поверхности фиксатора происходит повышение давления в полости гидромотора. Отключение гидромотора в конце фиксации производится с помощью реле максимального давления. Присутствие в кинематической цепи передаточного механизма самотормозящейся червячной пары способствует сохранению требуемой величины момента поджима планшайбы при фиксации. Разгрузка опор планшайбы при повороте и прижиге ее к направляющим после фиксации осуществляется гидроцилиндром. За счет изменения величины давления в напорной полости гидроцилиндра имеется возможность изменять момент трения в направляющих.

Основными требованиями, предъявляемыми к поворотным столам, являются обеспечение необходимой точности при возможно большей быстроходности и при одновременном ограничении величины динамических нагрузок на звенья механизмов. Эти требования явились теми основными критериями качества стола, на основе которых осуществлялся выбор той или иной модели. Выбранные критерии противоречивы: чем выше точность, тем ниже допустимая быстроходность механизма; чем выше быстроходность, тем чаще возникающие нагрузки выходят за допустимые пределы. Выбор наилучших режимов работы узлов машин-автоматов требует изу-

чения ряда вопросов, связанных с динамикой переходных процессов движения и фиксации.

Опыт эксплуатации и экспериментальные исследования поворотных столов показали, что погрешность фиксации δ_{ψ} , быстроходность $\omega_{\text{ср}}$ перемещаемых узлов и величина динамической нагрузки Q_{max} на звенья механизмов поворота подвержены стохастическим изменениям. Такое явление обусловлено стохастическим характером изменения величин параметров поворотного стола. Эксперименты показали, что при колебательном характере изменения скорости реверса случайные изменения пути реверса, обусловленные нестабильностью сил трения и разбросом моментов срабатывания гидро- и электроаппаратуры, приводят к стохастическому изменению скорости встречи планшайбы с фиксатором. Поэтому с целью придания задаче детерминированного характера было принято (с определенным запасом), что максимальная и минимальная величины усилия фиксации определяются соответственно максимальной и минимальной величинами скорости планшайбы на участке реверса. При принятых допущениях необходимо было найти сочетания параметров конструкции, обеспечивающие наилучшие режимы работы в соответствии с предъявленными к ней критериями качества.

Анализ динамики механизмов поворотных столов с учетом наложения некоторых детерминированных связей можно провести на модели, которая в общем случае представляет собой многомассовую нелинейную цепную систему. При исследовании динамики такой системы были приняты следующие допущения: 1) величины жесткости передаточного механизма и механизма фиксации для каждой модели принимаем постоянными; 2) пренебрегаем податливостью звеньев самотормозящейся червячной передачи; 3) учитываем деформации лишь рабочей жидкости гидропривода, так как модуль упругости стальных деталей гидромотора и трубопроводов в 130-150 раз превышает модуль упругости рабочей жидкости; 4) температуру рабочей жидкости принимаем постоянной; 5) объемными утечками в гидросистеме пренебрегаем; 6) при коротких трубопроводах, длина которых не превышает 3-8 м, не учитываем изменение давления в трубопроводе.

Модель, динамически эквивалентная рассматриваемой системе, представляет собой цепную нелинейную систему, где J_1 - приведенный к ведомому валу суммарный момент инерции ротора гидромо-

тора и рабочего объема жидкости; ψ_1 - угол поворота ротора гидромотора; J_2' и J_2'' - соответственно приведенные к ведомому валу моменты инерции червяка и червячного колеса; ψ_2' и ψ_2'' - углы поворота соответственно червяка и колеса; ψ_3 и J_3 - соответственно угол поворота и момент инерции ведомого звена; c_1 - приведенная к ведомому валу жесткость муфты, соединяющей ротор гидромотора и червяк; c_2 - жесткость валопровода между червячным колесом и фиксируемым узлом; $M_\tau = f(\dot{\psi}_3)$ - момент сил трения в направляющих фиксируемого узла; c_Φ - жесткость фиксатора и фиксирующих упоров.

Движение системы описывается следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} \ddot{\psi}_1 + \frac{b_1}{J_1}(\dot{\psi}_1 - \dot{\psi}_2) + \frac{c_1}{J_1}(\psi_1 - \psi_2) &= \frac{c_\Phi}{J_1} \int (\dot{\psi}_\Pi - \dot{\psi}_1) d\tau, \\ \ddot{\psi}_2 + \frac{b_1}{J_2 - \chi J_2'}(\dot{\psi}_2 - \dot{\psi}_1) + \frac{c_1}{J_2 - \chi J_2'}(\psi_2 - \psi_1) + \\ + \frac{\chi b_2}{J_2 - \chi J_2'}(\dot{\psi}_3 - \dot{\psi}_2) + \frac{\chi c_2}{J_2 - \chi J_2'}(\psi_3 - \psi_2) &= 0, \\ \ddot{\psi}_3 + \frac{b_2}{J_2}(\dot{\psi}_3 - \dot{\psi}_2) + \frac{c_2}{J_3}(\psi_3 - \psi_2) + \\ + \frac{c_\Phi}{J_3}(\psi_3 - \psi_{o.x}) + \frac{1}{J_3} M_\tau &= 0, \end{aligned}$$

где $\chi = M_I / M_\Pi$; M_I и M_Π - внутренние моменты, действующие на звенья самотормозящейся передачи, $\dot{\psi}_\Pi$ - установившееся значение скорости поворота ротора гидромотора; χ - динамическое передаточное отношение самотормозящейся передачи [1]; c_Φ - жесткость столба рабочей жидкости; b_1 и b_2 - коэффициенты сопротивления [2,3]. Здесь нелинейные свойства червячной передачи определены через функцию:

$$\chi = \begin{cases} \text{при } \dot{\psi}_1 > 0 \\ \left\{ \begin{array}{l} -tg\alpha^{-1}tg(\alpha + \rho) \text{ при } A < 0, \dot{\psi}_3 > 0 \\ - \text{ для тягового режима,} \\ tg\alpha^{-1}tg(\rho - \alpha) \text{ при } A > 0 \\ tg\alpha^{-1}tg(\rho - \alpha) \text{ при } A < 0, \dot{\psi}_3 < 0 \end{array} \right\} \\ \text{для режима оттормаживания} \\ \text{или заклинивания;} \\ \text{при } \dot{\psi}_1 < 0 \\ \left\{ \begin{array}{l} -tg\alpha^{-1}tg(\alpha + \rho) \text{ при } A < 0, \dot{\psi}_3 < 0 \\ - \text{ для тягового режима,} \\ tg\alpha^{-1}tg(\rho - \alpha) \text{ при } A < 0 \\ tg\alpha^{-1}tg(\rho - \alpha) \text{ при } A > 0, \dot{\psi}_3 > 0 \end{array} \right\} \\ \text{для режима оттормаживания} \\ \text{или заклинивания;} \end{cases}$$

где

$$A = J_2' b_1 (\dot{\psi}_2 - \dot{\psi}_1) + J_2' c_1 (\psi_2 - \psi_1) + J_2' b_2 (\dot{\psi}_3 - \dot{\psi}_2) + J_2' c_2 (\psi_3 - \psi_2),$$

α и ρ - соответственно углы подъема винтовой линии и трения в червячном зацеплении.

Характер изменения моментов сил трения $M_\tau = f(\dot{\psi}_3)$ был получен на основе известных экспериментальных исследований (рис. 3) [4]

$$M_\tau = \begin{cases} M_\tau = f(\dot{\psi}_3) \text{ при } \dot{\psi}_3 > \dot{\psi}_3^*, \\ M^* \text{ при } \dot{\psi}_2 = \dot{\psi}_3^*, \\ M = f(\dot{\psi}_3) \text{ при } 0 < \dot{\psi}_3 < \dot{\psi}_3^*, \\ M_0 \text{ при } \dot{\psi}_3 = 0, \text{ если } M_{\text{ог}} \geq M_0, \\ M_{\text{ог}} \text{ при } \dot{\psi}_3 = 0, \text{ если } -M_0 < M_{\text{ог}} < M_0, \\ -M_0 \text{ при } \dot{\psi}_3 = 0, \text{ если } M_{\text{ог}} \leq -M_0, \\ M = -f(\dot{\psi}_3) \text{ при } 0 > \dot{\psi}_3 > \dot{\psi}_3^*, \\ -M^* \text{ при } \dot{\psi}_3 = -\dot{\psi}_3^*, \\ M = -f(\dot{\psi}_3) \text{ при } \dot{\psi}_3 < -\dot{\psi}_3^*, \end{cases}$$

где $M_{\text{ог}} = c_\Phi (\psi_\Pi - \psi_1)$, M^* , M_0 и $\dot{\psi}_3^*$ - параметры кривой нелинейного демпфирования.

При моделировании задачи необходимо было спланировать вычислительный эксперимент таким образом, чтобы, используя уже имеющуюся информацию о параметрах и характеристиках поворотных столов, получить необходимые результаты с минимальными затратами времени.

Указанная задача решалась при помощи метода планируемого ЛП-поиска, который благодаря одно-временной реализации в нем идеи дискретного квазиравномерного по вероятности зондирования J - мерного пространства варьируемых параметров α_j ($j = 1, \dots, J$) и методологии планируемого математического эксперимента позволяет, с одной стороны, осуществлять глобальный квазиравномерный просмотр заданной области варьируемых параметров, а, с другой стороны, применить многие формальные оценки из математической статистики. Метод ПЛП-поиска успешно зарекомендовал себя при решении различных задач динамики машин [5-8].

Результаты натурных экспериментов использовались при уточнении расчетной схемы и пределов изменения варьируемых параметров. Исследовались столы одного типоразмера с моментом инерции планшайбы $J_3 = 5,1 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$.

Для них в качестве наиболее важных были приняты девять параметров: шесть параметров, неизменных в данном конструктивном исполнении (жесткости столба рабочей жидкости - c_Φ , муфты - c_1 , оси планшайбы - c_2 ; фиксатора и фиксирующих упоров - c_Φ , моменты инерции движущих масс, включая ротор гидромотора - J_1 ; к.п.д. червячной передачи - η); три параметра (скорость поворота и реверса - $\dot{\psi}_3$, путь реверса - $\psi_{o.x}$, момент трения в опорах - M_τ) - регулировочные.

При проведении первой серии экспериментов уточнялась математическая модель объекта. Сравнение результатов машинных экспериментов с натурными позволило убедиться в справедливости ранее принятых допущений, в соответствии с которыми расчет критериев качества производился по следующим формулам:

$$Q_{\max} = \frac{1}{R_{\phi}} \left(\sqrt{c_{\phi} J_3 (\dot{\psi}_3)_{\max}^2 + M_{\tau}^2} - M_{\tau} \right),$$

$$Q_{\min} = \frac{1}{R_{\phi}} \left(\sqrt{c_{\phi} J_3 (\dot{\psi}_3)_{\min}^2 + M_{\tau}^2} - M_{\tau} \right).$$

Отсюда $\Delta Q = Q_{\max} - Q_{\min}$ и $\delta_{\psi} = \Delta Q R_{\phi} / c_{\phi}$, где R_{ϕ} - радиус фиксации.

Выбор компромиссного решения производился одновременно с учетом величин трех ранее установленных критериев. Однако, для более обоснованного выбора компромиссного решения потребовалось введение дополнительных критериев: отжатия фиксатора в момент фиксации и неравномерности скорости планшайбы на участке реверса. Средняя скорость поворота определялась делением заданного угла поворота (определяемого числом позиций стола $Z_0 = 3$) на длительность цикла поворота и фиксации.

Таблица 1. Область изменения варьируемых параметров

		Пределы изменения параметров	
		Во всех ВЭ	В отобранных ВЭ
Критерии	$\delta\psi$, угл с	2,00 ÷ 176	2,0 ÷ 20
	$Q_{\max}$, кГ	1460 ÷ 9000	1390 ÷ 4100
	$\omega_{\text{ср}}$, с ⁻¹	0,2 ÷ -1,0	0,3 ÷ 0,8
Варьируемые параметры	$c_{\text{ж}} \times 10^4$, кГ/м	5,00 ÷ 100	46 ÷ 99
	$c_1 \times 10^4$, кГ/м	0,03 ÷ 0,20	0,04 ÷ 0,18
	$c_2 \times 10^4$, кГ/м	5,00 ÷ 100	7,9 ÷ 97
	$J_1 \times 10^{-3}$, кГсм с	0,64 ÷ 1,2	0,83 ÷ 1,2
	M_{τ} , кГм	7,4 ÷ 85	15,4 ÷ 49,2
	$\dot{\psi}_3$, с ⁻¹	0,05 ÷ 0,50	0,12 ÷ 0,33
	$\psi_{\text{ок}}$, рад	0,01 ÷ 0,08	0,02 ÷ 0,07
	$c_{\phi} \times 10^4$, кГ/м	100 ÷ 1000	212 ÷ 888
	η	0,20 ÷ 0,60	0,21 ÷ 0,52

Отбор лучших вариантов по этим критериям осуществлялся следующим образом.

1. Вначале выделялись те сочетания параметров, при которых величины δ_{ψ} были меньше допустимых ($6''$ у столов повышенной точности и $10''$ - у столов нормальной точности).

Из 32 сочетаний предварительно было отобрано десять, из которых лишь пять соответствовали нормам точности по ГОСТ.

2. Оставшиеся варианты сравнивались по величине $Q_{\max}$. По допустимой величине удельных давлений на фиксирующие поверхности (с коэффициентом запаса 1,8) отбрасывались те варианты, у которых $Q_{\max} > 4100$ кГ.

3. Из этих вариантов лучшими считались те, у которых при заданной точности быстроходность,

оценивавшаяся по $\omega_{\text{ср}}$ была выше. Пределы изменения варьируемых параметров для отобранных таким образом шести механизмов заметно сузились (табл. 1).

4. Для отобранных вариантов быстроходность была рассчитана также и для других возможных чисел позиций $Z_0 = 2 \div 20$. С увеличением Z_0 средняя скорость $\omega_{\text{ср}}$ уменьшается тем интенсивнее, чем больше у данного механизма путь реверса. Это дало возможность уточнить отбор вариантов.

5. Выделенные варианты сравнивались по быстроходности и точности (с учетом величины момента инерции J_3) с данными, полученными при исследовании других поворотных столов отечественного и зарубежного производства с целью определения целесообразной области применения данного привода.

Проведенные исследования поворотного стола с реверсируемым гидромотором и двойной фиксацией показали, что этот привод обеспечивает достаточно высокую быстроходность в столах с нормальной и повышенной точностью. При низких требованиях к точности фиксации применение такой конструкции нецелесообразно из-за ограничений по быстроходности.

Анализ вычислительных экспериментов при решении задачи выбора параметров транспортных устройств показал, что использование планируемого ЛП-поиска при ее детерминированной постановке позволяет получить вполне корректные результаты, согласующиеся с имеющимися опытными данными. Так, уже при 32 испытаниях были получены отдельные модели, совпадающие с лучшими аналогичными устройствами зарубежных фирм.

1. Вейц В.Л. Динамика машинных агрегатов. - М.-Л.: Машиностроение, 1969. - 412 с.
2. Вейц В.Л., Кочура А.Е., Мартыненко А.М. Динамические расчеты приводов машин. - Л.: Машиностроение, 1971. - 372 с.
3. Зайченко И.З. Автоколебания в гидропередачах металло-режущих станков. - М.: Машгиз, 1958. - 258 с.
4. Пановко Я.Г. Внутреннее трение при колебаниях упругих систем. - М.: Физматгиз, 1960. - 264 с.
5. Статников И.Н., Фирсов Г.И. Проблемы развития интеллектуальных методов решения задач проектирования машин и механизмов на основе планируемого вычислительного эксперимента // Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении. II Международная научная конференция. (Москва, 13-15 ноября 2012 г.). Научные труды. - М.: ИМАШ РАН, 2012. - С. 418-423.
6. Статников И.Н., Фирсов Г.И. Технология интеллектуализации в исследовании многомерных и многокритериальных задач проектирования машин и механизмов // Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении. III Международная научная конференция. (Москва, 13-15 мая 2014 г.). Научные труды. - М.: Издательский дом «Спектр», 2014. - С. 325-327.
7. Статников И.Н., Фирсов Г.И. Интерактивное структурирование пространства параметров при проектировании динамических систем // Вестник Тамбовского государственного технического университета. - 2015. - № 1. - С.36-41.
8. Statnikov I.N., Firsov G.I. Using sobol sequences for planning experiments // Journal of Physics: Conference Series. - 937 - 2017. - 012050. - P. 1-3.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЗАВИСИМОСТИ МЕХАНИЧЕСКОГО ОТКЛИКА ПРОВОДНИКА НА ВНЕШНЕЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ

В.И. Стащенко¹, О.Б. Скворцов^{1,2}, О.А. Троицкий¹

¹Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; vis20-11@rambler.ru

²Научно-технический центр «Завод балансировочных машин», Москва, Россия

Рассмотрено действие одиночных электрических импульсов на проводник. При таком воздействии в начальные моменты переднего и заднего фронтов электрического импульса формируются механические удары противоположных направлений. После этого в проводнике начинается изменение, а механические удары вызывают затухающие гармонические колебания в продольном и поперечном направлениях. Амплитуда механического отклика при этом линейно зависит от амплитуды внешнего электрического воздействия.

Введение

Исследования взаимодействия электрических импульсов с материалом проводника [1-4] показали, что в проводнике формируется вибрационный отклик, не связанный с тепловыми эффектами, определяемыми действием электрического тока. При этом наблюдается зависимость полярности вибрационного отклика от полярности приложенного электрического импульса [5-8]. Представленные ниже результаты экспериментальных исследований показывают, что в проводниках наблюдается независимое развитие динамических изменений механических и магнитных процессов, зависящих от изменений тока через проводник.

Методика исследований

При исследовании особенностей вибрационного отклика на одиночные проводники из различных материалов подавался прямоугольный электрический импульс. Величину вибрации в продольном и поперечных направлениях измеряли с помощью акселерометров, установленных на проводнике. Синхронно с измерением вибрации выполнялся контроль магнитного поля вокруг проводника с помощью датчиков магнитной индукции. Пример структурной схемы стенда для таких испытаний показан на рис. 1.

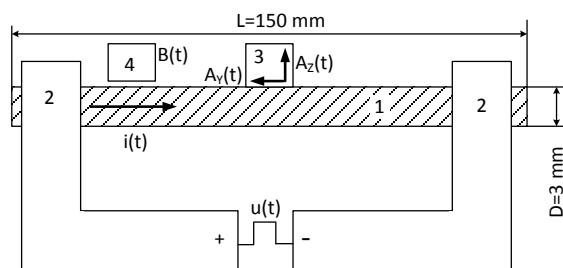


Рис. 1. Структура стенда для контроля вибрационного отклика проводника 1 на действие прямоугольного электрического импульса $u(t)$ через шины 2 для подключения проводника. Акселерометр 3 и датчик магнитной индукции 4.

Для получения зависимостей вибрационного отклика длительность внешнего импульса и его амплитуду изменяли в процессе испытаний. Сигналы от датчиков записывали с использованием компьютерной системы сбора данных с последующим де-

тальным анализом. Длительность электрических импульсов можно изменять в диапазоне от 20 до 2000 мкс. При воздействии электрических импульсов в проводнике возникает электрический ток с плотностью до нескольких тысяч ампер на квадратный миллиметр.

Результаты экспериментов

При действии прямоугольных электрических импульсов на проводник происходит плавное увеличение тока в начале импульса и снижение после его окончания. Изменения тока через проводник при таких плавных изменениях определяются самоиндукцией проводника и влиянием скин-эффекта. Изменения тока через проводник пропорциональны изменениям магнитного поля, которые фиксируются датчиком магнитной индукции. Типовые зависимости ортогональных компонент магнитной индукции представлены на рис. 2.

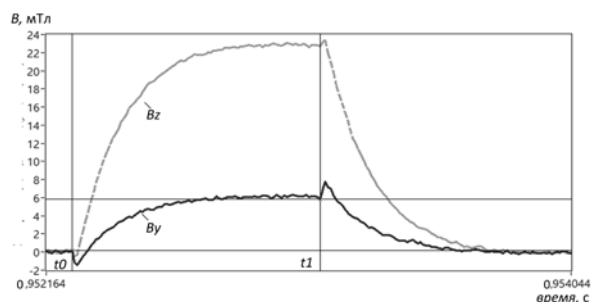


Рис. 2. Изменение ортогональных компонент магнитной индукции для проводника из золота диаметром 3 мм

Ортогональные компоненты магнитной индукции измеряются датчиками Холла, оси чувствительности которых расположены ортогонально и лежат в плоскости поперечного сечения проводника. Величину вектора магнитной индукции при этом можно вычислить как сумму квадратов ортогональных составляющих. Такое определение магнитной индукции использовано для получения адекватных оценок магнитного поля в случае профиля поперечного сечения проводника, отличающегося от круглого, а также для исключения погрешностей ориентации в плоскости сечения осей чувствительности датчика магнитного поля.

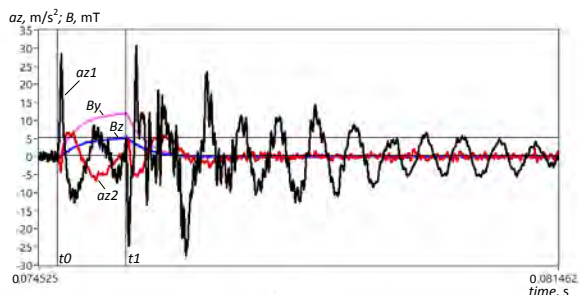


Рис. 3. Вибрационный отклик по поперечному вибрационному ускорению $az1$ и $az2$ на противоположных сторонах проводника из золота диаметром 3 мм и компонент Bx и Bz магнитной индукции

Обсуждение результатов

Как следует из зависимостей вибрационного отклика от времени, показанных на рис. 3 для поперечного направления проводника характерна изгибаемая форма деформации. При действии электрического импульса в начальные моменты фронтов формируются механические удары малой длительности (менее 20 мкс), которые затем переходят в затухающие гармонические колебания, на которые не влияет изменение тока через проводник.

Результаты в виде зависимости оценок размаха вибрационных перемещений в поперечном направлении для проводника из стали от величины размаха величины магнитной индукции представлены на рис. 4.

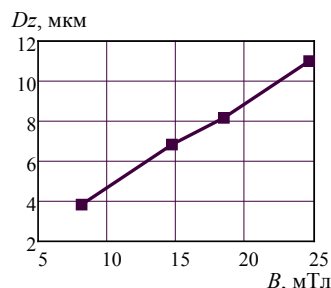


Рис. 4. Зависимость размаха оценки вибрационного отклика для проводника из стали 80 в виде поперечного перемещения для образца диаметром м.

Результаты в виде зависимости оценок размаха вибрационных ускорений в осевом Ay и поперечном Az направлениях, а также перемещений в поперечном направлении Dz для проводника из серебра с круглым и прямоугольным поперечным сечением от величины размаха величины магнитной индукции показаны на рис. 5.

Результаты в виде зависимости оценок размаха вибрационных перемещений в поперечном направлении для проводника из золота от величины размаха величины магнитной индукции представлены на рис. 6

Для всех проводников из различных испытанных материалов характерна линейная зависимость амплитудных оценок вибрационного отклика от ам-

плитуды внешнего электрического импульса.

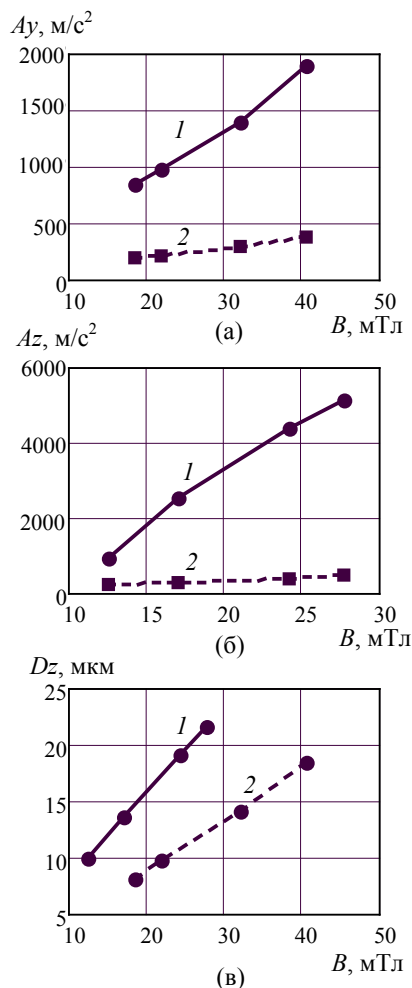


Рис.54. Вибрационный отклик . Осевое ускорение (а), поперечное ускорение (б) и поперечное перемещение (в) для проводников из серебра диаметром 2 мм и прямоугольного сечения площадью 2 мм².

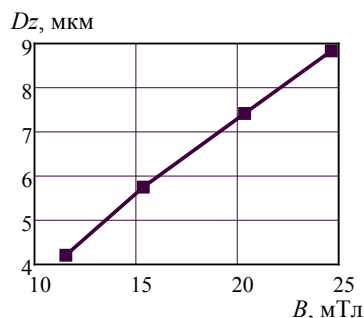


Рис. 6. Вибрационный отклик по поперечному перемещению для проводника из золота диаметром 3 мм

Линейная зависимость вибрационного отклика позволяет плавно управлять процессом проявления электропластического и вибропластических

эффектов [9-13], используемых при обработке металлов давлением с дополнительными воздействиями электрических импульсов, СВЧ-облучения и вибрационных и ультразвуковых колебаний пластические и другие механические свойства материала.

Заключение

Представленные результаты показывают последовательный характер развития вибрационного отклика проводника на действие внешнего электрического импульса. Формируемые на фронтах электрического импульса ударные механические процессы создают затем затухающие гармонические колебания в материале проводника, которые происходят независимо от изменений тока через проводник, вызывающего температурный нагрев материала. Независимый характер механических, тепловых и электрических процессов обеспечивает возможность более гибкого управления технологическими процессами при обработке металлов с использованием электропластического эффекта.

1. Скворцов О.Б., Сташенко В.И., Троицкий О.А. Динамические эффекты в проводниках при воздействии импульсных токов // Вестник Сибирского государственного индустриального университета № 1 (31), 2020, С. 27-34.
2. Троицкий О.А., Скворцов О.Б., Сташенко В.И. Методика оценки амплитуды вибрации поверхности металла на фронтах импульса тока при электроимпульсном воздействии // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации (Москва) Т.76, № 5. 2020. – С.471-477.
3. Скворцов О.Б., Сташенко В.И., Троицкий О.А. Разработка методики исследования вибраций под влиянием импульсов тока в металлах, находящихся в статическом состоянии // Научные чтения им. чл.-корр. РАН И.А. Оdinga «Механические свойства современных конструкционных материалов». Москва. 17-18 сентября 2020 г./ Сборник материалов. – М: ИМЕТ РАН, 2020, - С.142-143.
4. Скворцов О.Б., Сташенко В.И., Троицкий О.А. Разработка методик исследования вибраций в деформируемом металле при одновременном действии тока и свч-излучения // Научные чтения им. чл.-корр. РАН И.А. Оdinga «Механические свойства современных конструкционных материалов». Москва. 17-18 сентября 2020 г./ Сборник материалов. – М: ИМЕТ РАН, 2020, - С.143-144.
5. Троицкий О.А., Сташенко В.И., Скворцов О.Б., Савенко В.С., Самуйлов С.Д., Терещук В.С., Зайцев С.В., Иванов А.М. Интенсивная пластическая деформация металла при токовых и СВЧ - воздействиях. Новые данные и закономерности // Изд-во КИМ Л.А., М.: 2020. - 342 с.
6. Скворцов О.Б., Сташенко В.И., Троицкий О.А. Динамика развития деформационных процессов при электроимпульсном воздействии на металл // Новые материалы: Неравновесные состояния: Сборник тезисов докладов 18-й Международной школы-конференции для молодых ученых и специалистов. Москва, 14 – 17 декабря 2020 г. М.: НИЯУ МИФИ, 2020. – С.56-57.
7. Троицкий О.А., Сташенко В.И., Скворцов О.Б. Интенсивная деформация металла при токовых и иных энергетических воздействиях. Новые данные и закономерности // Шестой междисциплинарный научный форум с международным участием «Новые материалы и перспективные технологии», М.: 23-27 ноября 2020. Сборник материалов, Т.1. АНО ЦНТР, 2020. – С.992-996.
8. Stashenko V.I., Skvorcov O.B. and Troickij O.A. Design of mechanical properties of structural materials for power plant equipment // 17th International School-Conference "New Materials: Advanced Technologies", IOP Publishing, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 1005 (2020) 012021, 7 p.
9. Сташенко В.И., Скворцов О.Б., Троицкий О.А. Электродинамические процессы в проводниках при воздействии электрическими импульсами // Проблемы машиностроения и автоматизации. №1, 2021. – С.39-47.
10. Скворцов О.Б., Сташенко В.И., Троицкий О.А. Влияние термического нагрева на вибрационный отклик проводников от электрического импульса // VI Международная научно-техническая конференция «Современные методы и средства исследований теплофизических свойств веществ». 27 – 28 мая 2021 г.: Материалы конференции. – СПб.: Университет ИТМО, 2021. – 76-77.
11. Сташенко В.И., Скворцов О.Б., Троицкий О.А. Закономерности электропластического и вибропластического воздействия на металлы при их обработке // Инновационные технологии в машиностроении : сборник трудов XII Международной научно-практической конференции / Юргинский технологический институт. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2021. – С. 21-26.
12. Троицкий О.А., Скворцов О.Б. Взаимодействие электрического импульса с проводниками – задачи и эксперименты // Сборник трудов международной научно-практической конференции «Инженерно-техническое образование и наука» (г. Новороссийск, 21-22 апреля 2021 г.) / под общ. ред. к.ф.н. доцента И. В. Чистякова. – Новороссийск: Изд-во НФ БГТУ им. В.Г. Шухова, 2021. – С. 69-71.
13. Сташенко В.И., Скворцов О.Б., Троицкий О.А. Электроимпульсные процессы и механические релаксации в проводниках // Российская научно-техническая конференция с международным участием. [Электронный ресурс]: Сборник докладов конференции «Инновационные технологии в электронике и приборостроении» Физико-технологического института РТУ МИРЭА Том 1. — М.: РТУ МИРЭА, 2021.— С. 83-88.

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ЗАГУЩЕННЫХ СУЛЬФОНАТАМИ КАЛЬЦИЯ

С.С. Стрельникова¹, А.В. Песковец², В.Д. Самусенко¹, И.А. Буяновский¹,
И.Р. Татур², Л.Н. Багдасаров²

¹ Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва, Россия;

² РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Москва, Россия

Приведены результаты испытания пластичных смазочных материалов, приготовленных на основе сульфонатов кальция. Для приготовления смазок использовались различные загустители и базовые масла с целью поиска оптимальной композиции. Для определения трибологических свойств сульфонатных смазок использовался температурный метод, испытания проводились в диапазоне температур 30-300°C. Смазки показали схожую динамику изменения коэффициента трения от температуры, что связано с идентичным механизмом действия сульфонатного загустителя при образовании модифицированного поверхностного слоя. Оптимальным сочетанием физико-химических и трибологических свойств обладает образец с загустителем С-300 «А» и дисперсионной средой – масла VHVI-4 и С-9.

Ужесточение режимов работы узлов трения в современных механизмах неизбежно приводит к поиску смазочных материалов, работоспособных в широком интервале температур и, при этом, сохраняющих высокий уровень эксплуатационных характеристик в течение долгого времени [1]. Одним из таких материалов являются сульфонатные пластичные смазки, которые, в силу своих отличных природных характеристик, всё больше применяются как «универсальные» смазки [2].

По современным представлениям, высокие трибологические характеристики смазок, загущенных сульфонатами кальция, связаны с образованием на поверхности трения высокопрочного слоя карбоната кальция в форме кальцита [3], который формируется в процессе приготовления смазки. Из трёх возможных полиморфных модификаций карбоната кальция, именно кальцит обеспечивает отличные противозадирные характеристики и низкую смываемость водой сульфонатных смазок, поэтому важно уделять внимание стадии структурообразования при их приготовлении.

Цель работы – исследование влияния состава сульфонатных пластичных смазочных материалов на их трибологические свойства в широком диапазоне температур.

Материалы и методы

Для исследования взяты образцы сульфонатных смазок, приготовленные на загустителях с разным уровнем щелочного числа: сульфонат кальция марки КНД-150 «А» (ТУ 38.1011283-2004), высокощелочной сульфонат кальция С-300 «А» (ТУ 38.301-19-115-99) и синтетический сульфонат кальция ССК-400D (ТУ ВУ 390401182.022-2011). В качестве дисперсионной среды использовали масло изопарафиновое VHVI-4 (ТУ 38.401- 58-415-2014).

Для изучения влияния дисперсионной среды на исследуемые показатели дополнительно приготовлены образцы на следующих дисперсионных средах: масло для производства химических волокон С-9 (ТУ 38-1-01-33-70) с содержанием ароматических углеводородов 20%, полиальфаолефиновое масло ПАО-4 (ТУ 0253-014-54409843-2007), полиалкилбензол марки ПАБ-С (ТУ 2414-025-05766480-2006). В качестве загустителя для этих смазок использовали сульфонат кальция марки С-300 «А».

Все сульфонатные смазки приготовлены по технологии, разработанной на кафедре химии и технологии смазочных материалов и химмотологии РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина [4]. Содержание загустителя в испытуемых образцах составляет 67% масс. Основные физико-химические характеристики образцов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Основные физико-химические характеристики сульфонатных смазок

Наименование показателя	Состав образцов пластичных смазочных материалов					
	Загуститель КНД-150 «А», масло VHVI-4 №1	Загуститель С-300 «А», масло VHVI-4 №2	Загуститель ССК-400D, масло VHVI-4 №3	Загуститель С-300 «А», масло С-9 №4	Загуститель С-300 «А», масло ПАО-4 №5	Загуститель С-300 «А», масло ПАБ-С №6
Температура каплепадения (ГОСТ 6793-74), °С	235	>250	>250	>250	>250	>250
Коллоидная стабильность (ГОСТ 7142-74), % масс	0,57	0,49	0,29	0,33	0,23	0,36
Предел прочности при 20 °С (ГОСТ 7143-73, метод Б), Па	155	1260	870	1060	1280	1640
Эффективная вязкость при 20 °С (ГОСТ 7163-84), Па·с	60	844	573	620	620	592
Диаметр пятна износа при 392 Н (ГОСТ 9490-75), мм	0,59	0,76	0,71	0,66	0,57	0,67

Для оценки трибологических показателей использовался температурный метод оценки смазочной способности на четырёхшариковой машине КТ-2, в котором реализована низкая скорость относительного перемещения трущихся тел (0,24 мм/с), что практически устраняет фрикционный нагрев, а температура в узле трения задаётся от внешнего источника тепла [5]. Испытания проводились на оборудовании Центра коллективного пользования Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН.

Исследование проводили в диапазоне температур 30-300 °С. Температура узла трения ступенчато повышалась со скоростью 4 °С в минуту. Коэффициент трения оценивался в течение 60 с через каждые 10 °С. Осевая нагрузка на узел трения составляла 107,8 Н (то есть, контактная нагрузка на один шар была равна 44,2 Н, а давление в контакте верхнего и каждого из нижних шариков (по Герцу) составляет примерно 2 ГПа). Для испытаний использовали стандартные подшипниковые шарики из стали 100Cr6 (аналог отечественной стали ШХ15) диаметром 7,94 мм. В качестве регистрируемых параметров выступали температура смазочного материала и значение момента трения, на основе которого определяли коэффициент трения.

Результаты и их обсуждение

Анализ результатов, приведенных в таблице 1, позволяет заключить, что все исследуемые образцы сульфатных смазок обладают высоким уровнем эксплуатационных характеристик. Сульфатная смазка на основе загустителя КНД-150 «А» имеет невысокие, по сравнению с другими образцами, значения предела прочности и эффективной вязкости, что объясняется отсутствием в загустителе достаточного количества карбоната кальция для формирования прочной структуры.

На рисунке 1 показаны результаты трибологических испытаний сульфатных смазок в виде зависимостей коэффициента трения от температуры. На начальном этапе, когда происходит разрушение адсорбционного граничного слоя с повышением температуры, как загуститель, так и масло в составе смазки значительно влияют на антифрикционные свойства приготовленных образцов. Начиная с температур 150-160 °С происходит снижение коэффициента трения, что, по-видимому, связано с началом образования на поверхности модифицированного слоя, состоящего из карбоната кальция, на этом этапе все смазки показали абсолютно схожую динамику, что говорит об идентичности механизма образования антифрикционного слоя.

Для смазок №2 и №4 на загустителе С-300 «А» чётко видна переходная критическая температура, для других образцов так четко выраженной критической температуры не наблюдалось, в основном коэффициент трения постепенно увеличивается, достигая своих максимальных значений. Во время испытаний образцов с загустителем С-300 (2, 4, 5, 6), наблюдался меньший коэффициент трения, чем со смазочными материалами на других загустителях (1, 3).

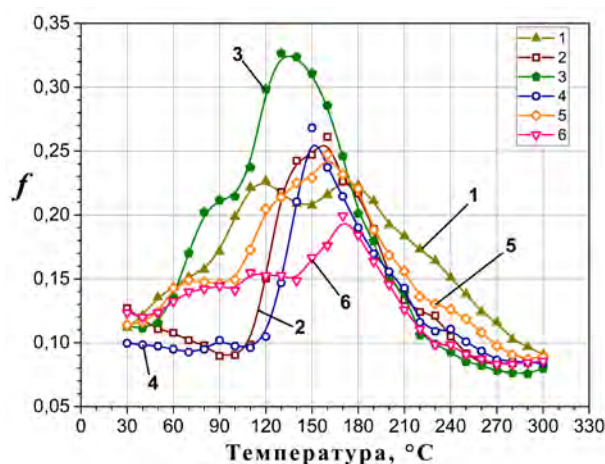


Рис. 1. Зависимости коэффициента трения от температуры сульфатных смазок (нумерация соответствует таблице 1)

Наибольшее влияние дисперсионная среда и загуститель оказывают на этапе до образования на поверхностях трения модифицированного слоя.

Образец сульфатной смазки на синтетическом сульфате кальция ССК-400D показывает максимальное значение коэффициента трения при температурах 120-160 °С. Вероятно, это связано с отсутствием в системе загуститель-масло поверхностно-активных веществ (ПАВ) и ароматических соединений, способных адсорбироваться на поверхности, тем самым снижая коэффициент трения. Это подтверждается результатами испытаний образца сульфатной смазки №6, в котором дисперсионная среда – смесь диалкилбензолов с дифенилалканами, которые, за счет своей склонности к поляризации, способны адсорбироваться на поверхности трения и формировать защитный слой, что обуславливает во всем температурном диапазоне значение коэффициента трения не выше 0,2.

Аналогично ведут себя образцы сульфатных смазок №2 и №4, для которых с увеличением температуры возрастает коэффициент трения. Однако до определенной температуры (рис. 1) можно наблюдать постоянство коэффициента трения, которое, по-видимому, связано с адсорбцией на поверхности трения смол и ароматических углеводородов, входящих в состав дисперсионных сред.

С началом образования на поверхности трения модифицированного слоя (при температуре выше 150-160 °С), именно он оказывает основное влияние на антифрикционность поверхностей при граничной смазке, наиболее высокий коэффициент трения на этом этапе показывала смазка на загустителе КНД-150 «А», который имеет в своем составе наименьшее содержание карбоната кальция.

На рисунке 2 показаны пятна износа после испытания сульфатных смазок до температуры 300 °С. Наибольший износ получен при испытании образцов 1 и 5, хотя разница по износу всех образцов не значительна, за счет небольшого пути трения при испытаниях. Наименьший износ получен при испы-

тании образцов 2 и 4. Из этого можно сделать предположение, что основной износ накапливается на начальном этапе испытаний до 150 °С.

Закключение

Испытанные сульфонатные смазки показали схожую динамику изменения коэффициента трения от температуры, что связано с идентичным механизмом действия сульфонатного загустителя в разных композициях.

В диапазоне температур 30-160 °С на коэффициент трения сульфонатных смазок влияет как дисперсионная среда, так и загуститель, компоненты которых способны образовывать на поверхности трения адсорбционный антифрикционный слой. При температурах свыше 160 °С основное влияние на антифрикционные свойства смазки оказывает загуститель.

При 300 °С коэффициенты трения смазок практически одинаковы, что говорит об одной природе образовавшегося на поверхности трения модифицированного слоя карбоната кальция, вне зависимости от щелочного числа используемого загустителя и типа дисперсионной среды.

Оптимальным сочетанием по физико-химическим и трибологическим показателям обладают образцы сульфонатных смазок №2 и №4 (с загустителем С-300 «А» и дисперсионной средой – масла VHVI-4 и С-9).

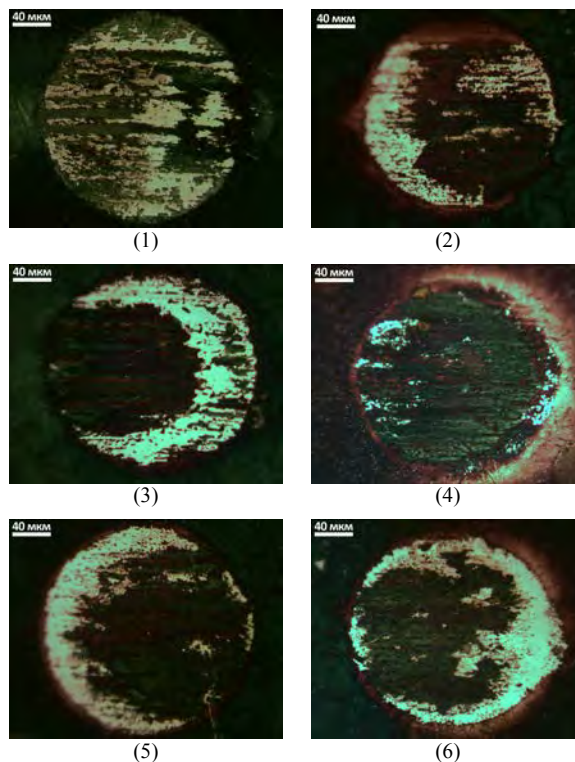


Рис. 2. Пятна износа после испытания сульфонатных смазок (нумерация соответствует таблице 1)

1. Lugt P. M. Modern advancements in lubricating grease technology //Tribology international. – 2016. – Т. 97. – С. 467-477.
2. Кальянова О.А., Песковец А.В., Татур И.Р., Багдасаров Л.Н. Особенности производства и применения сульфонатных смазок / Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. – № 3. – 2021.– С. 50-56.
3. Liu D., Zhao G., Wang X. Tribological performance of lubricating greases based on calcium carbonate polymorphs under the boundary lubrication condition // Tribology Letters. – 2012. – Т. 47. – №. 2. – С. 183-194.
4. Анисимова А.А. Исследование влияния добавок на свойства сульфонатных пластичных смазок: дис. кандидата технических наук: 05.17.07 / Анисимова Анна Алексеевна; [Место защиты: Рос. гос. ун-т нефти и газа им. И.М. Губкина]. – Москва, 2018. – 170 с.
5. Буяновский И.А., Лашхи В.Л., Самусенко В.Д. Развитие температурного метода оценки смазочной способности масел // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. – 2017. – № 2. – С. 28-33.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ ТВЕРДЫХ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ

М.А. Токмакова, А.Н. Новиков, А.Ю. Родичев

Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, Орел, Россия; gorin57@mail.ru

Материал статьи содержит исследование влияния технологических факторов на формирование пленочного антифрикционного покрытия при нанесении на детали машин и автомобилей. В статье приведена методика и результаты расчета прочности сцепления пленочного покрытия со стальным основанием. Представлено применяемое оборудование для определения прочности сцепления. Описана методика использования указанного оборудования. Установлена и описана зависимость прочности сцепления от режимов нанесения пленочного покрытия. Разработаны рекомендации по выбору и способу нанесения пленочных антифрикционных покрытий при техническом обслуживании и ремонте автомобильного транспорта.

Цель

Сегодня по всему миру продают огромное количество различных пленочных покрытий, разных по составу и своим свойствам. Они отличаются упаковкой, способом нанесения, и своим назначением. Немало важным фактором является и ценовая политика на покрытия такого типа [1]. Зачастую потребитель оказывается в сложной ситуации при выборе того что ему необходимо. Основная проблема заключается в том что, необходимо выбрать покрытие которое будет выполнять свои функции, легко наноситься на поверхность изделия, не требуя сложных приспособлений и оборудования и при этом иметь высокую адгезионную прочность сцепления с основным металлом [2,3]. Во многих случаях производитель не указывает один из основных и важных параметров, таким является прочность сцепления. Этот параметр является основополагающим при дальнейшей эксплуатации изделия. От него во многом зависят трибологические свойства сформированного пленочного покрытия [4,5]. Исследование прочности сцепления пленочного покрытия с основой, подготовка поверхности к его нанесению заслуживают особого внимания, для предоставления дальнейших рекомендаций при их широком применении.

Материалы и методы

Одним из главных параметров работы узла (трибузла) является износостойкость. Она определяет ресурс трибузла и зависит от технологических и эксплуатационных параметров [6,7]. Повысить износостойкость можно в первую очередь технологически – путем формирования пленочного антифрикционного покрытия на поверхности трения. Процесс образования пленочного антифрикционного покрытия можно представить в виде следующих операций:

- предварительная обработка (подготовка) поверхности;
- нанесение первого слоя пленочного покрытия;
- наращивание последующих слоев антифрикционного покрытия.

Процесс образования пленочного антифрикционного покрытия имеет много общего с нанесением лакокрасочного покрытия. Таким образом, прочность

сцепления пленочного покрытия (адгезию) определяется зависимостью:

$$Y = f(L, \alpha, C, Ra, t, \rho, v, d, D), \quad (1)$$

где L - дистанция нанесения покрытия, мм;
 α - угол нанесения покрытия, град;
 C - способ подготовки поверхности;
 Ra - шероховатость поверхности, мкм;
 t - температура окружающей среды, °C;
 ρ - плотность наносимого покрытия, г/л;
 v - влажность окружающей среды, %;
 d - диаметр диффузора распылителя, мм;
 D - давление в воздушной магистрали, атм.

При проведении технического обслуживания и ремонта автомобильной техники, особо остро встает вопрос с подготовкой поверхности перед нанесением пленочных покрытий и нахождение оптимальных параметров (шероховатость поверхности изделия, угол нанесения покрытия и дистанции напыления). Рассмотрим, как связаны эти параметры с прочностью сцепления пленочных покрытий с основой.

После изучения литературных источников, мы остановили свой выбор на методе определения адгезионной прочности нормальным отрывом [8-10]. Этот метод распространяется на дезактивируемые защитные лакокрасочные покрытия толщиной до 400 мкм (однослойные и многослойные), нанесенные на металлические основания, и устанавливает метод определения адгезионной прочности покрытий нормальным отрывом, основанный на измерении силы, необходимой для отрыва покрытий в направлении, перпендикулярном его поверхности (рис. 1). Образец для испытаний представляет собой две цилиндрические поверхности 1 и 4 на одну из которых наносится антифрикционное покрытие 3, после его высыхания, обе поверхности склеиваются специальным клеем 2. Конструктивные параметры образцов приведены на рисунке 2.

Предел прочности антифрикционного покрытия при отрыве образца (σ) вычисляют по формуле.

$$\sigma = P/F, \quad (2)$$

где P - сила отрыва образца, Н;
 F - площадь основания, м².

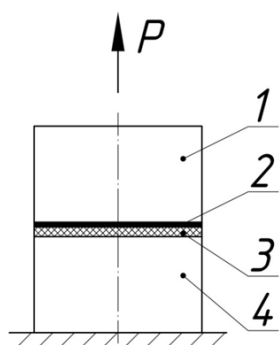


Рис. 1. Схема испытания пленочного антифрикционного покрытия

Согласно проведенным исследованиям [11,12] нами был выбран один тип покрытия для дальнейшего углубленного изучения его адгезионных свойств. Это антифрикционное покрытие на основе дисульфида молибдена (12 %) с органическим связующим, отверждаемое при нормальной температуре.

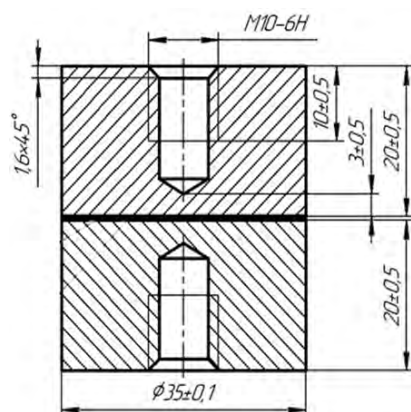


Рис. 2. Конструктивные параметры склеенных образцов

Было нанесено два слоя покрытия, при этом каждый последующий слой наносился после полного высыхания предыдущего. Суммарная толщина покрытия составила 15 мкм. Величину толщины слоя антифрикционного покрытия контролировали после каждого нанесенного слоя с помощью толщиномера ЕТ 11Р. Замеры выполнялись на предполагаемых участках испытаний, при этом величина замеров не превысила 7%, что удовлетворяет предъявляемым требованиям.

Испытания образцов проводили на разрывной машине универсального назначения с электронным силоизмерителем ИР5047-50 при температуре 20°C и относительной влажности 70 % представленной на рисунке 3.

Постоянные параметры для всех образцов:

С - способ подготовки поверхности – пескоструйная обработка;

t - температура окружающей среды – 20°C;

ρ - плотность наносимого покрытия – 1200 г/л;

v - влажность окружающей среды – 75 %;

d - диаметр диффузора распылителя – 1,1 мм;

D- давление в воздушной магистрали – 3 атм.



Рис. 3. Универсальная разрывная машина ИР5047-50

Экспериментальный образец устанавливается в зажимы универсальной разрывной машины ИР5047-50 как показано на рисунке 4.

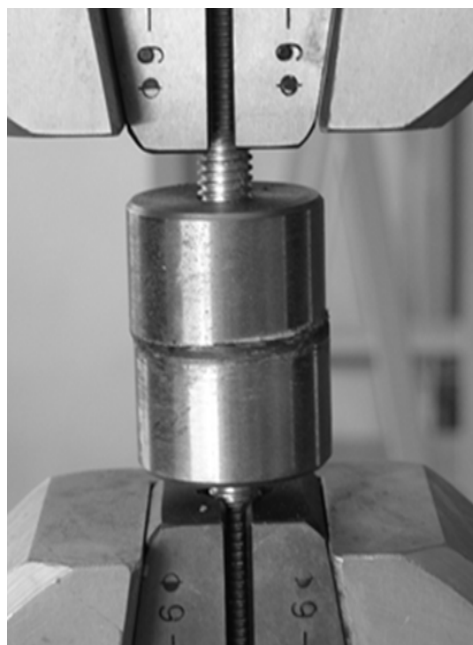


Рис. 4. Экспериментальный образец, установленный в зажимах в процессе разрушения

В качестве математической модели, описывающей зависимость изменения прочности сцепления, была выбрана статистическая регрессионная модель [19,20]. Для получения адекватной модели был поставлен и проведен уровневый факторный эксперимент типа 2³, который ставился в локальной области

времени. За выходной параметр Y принимали значение прочности сцепления $\sigma_{\text{сц}}$, МПа.

На основании предварительных исследований и анализов литературных данных в качестве основных факторов, влияющих на прочность сцепления, были выбраны следующие:

- X1 – дистанция нанесения покрытия L , мм;
- X2 – шероховатость поверхности Ra , мкм;
- X3 – угол нанесения покрытия α , град.

Выбор уровней и интервалов варьирования факторов проводили на основании предварительных опытов.

Был проведен полнофакторный эксперимент на $5 \times 5 \times 5 = 125$ показаний. В результате проведенных вычислений уравнение зависимости прочности сцепления от исследуемых факторов было получено уравнение регрессии, которое имеет следующий вид:

$$Y = -8,12 + 0,126x_1 + 0,575x_2 - 0,00033x_1^2 - 0,197x_2^2. \quad (3)$$

Подставим вместо обозначений факторы, получим уравнение следующего вида:

$$Y = -8,12 + 0,126L + 0,575Ra - 0,00033L^2 - 0,197Ra^2. \quad (4)$$

Результаты и их обсуждения

Результаты испытания по определению прочности сцепления основного металла образца и наносимого пленочного антифрикционного покрытия приведены на рисунках 5 - 7.

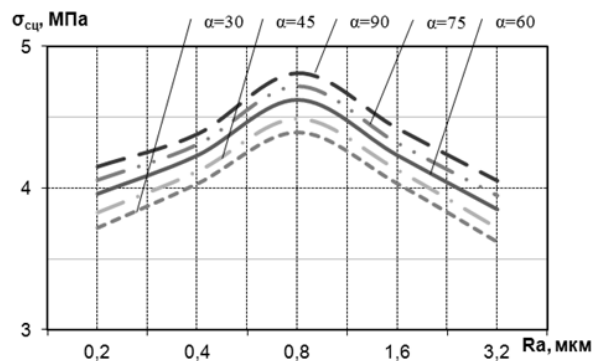


Рис. 5. Влияние параметров шероховатости Ra на прочность сцепления $\sigma_{\text{сц}}$

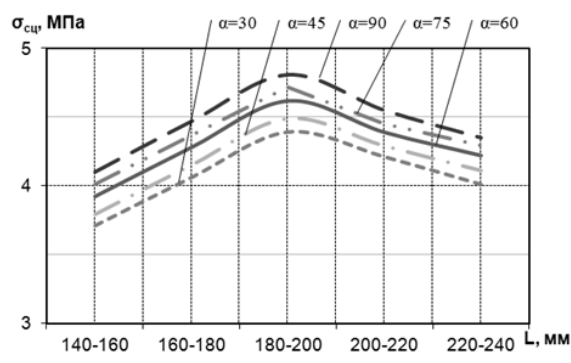


Рис. 6. Влияние дистанции нанесения покрытия L на прочность сцепления $\sigma_{\text{сц}}$

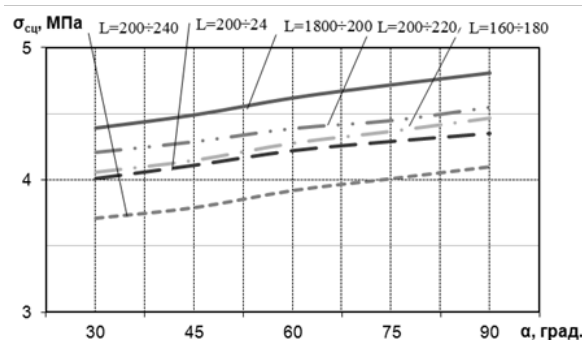


Рис. 7. Влияние угла нанесения покрытия α на прочность сцепления $\sigma_{\text{сц}}$

Анализ графиков полученных зависимостей показывают, что на изменение прочности сцепления доминирующее влияние оказывает изменение количественных значений величины дистанции нанесения покрытия. Вторым по значимости фактором, влияющим на прочность сцепления, является шероховатость поверхности. Угол нанесения покрытия оказывает наименьшее влияние на прочность сцепления.

Выводы

В результате проведения исследований и анализа уравнения регрессии было выявлено, что пленочные антифрикционные покрытия возможно наносить на поверхности различного качества обработки.

С практической же точки зрения на изменение прочности сцепления оказывает значение не только независимое изменение количественных значений исследуемых факторов, а их совместное взаимодействие.

При этом наибольшую прочность сцепления можно достичь при следующих рациональных значениях технологических факторов: дистанции нанесения покрытия $L=180 \div 200$ мм, шероховатости поверхности $Ra=0,8$ мкм и углом нанесения покрытия $\alpha=90 \pm 5$ град.

- Chijia Wang, Huaiyuan Wang, Meiling Li, Zhanjian Liu, Ningzhong Bao Anti-corrosion and wear resistance properties of polymer composite coatings: Effect of oily functional fillers. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, Volume 85, April 2018, P. 248-256.
- Курбатова И.А. Технология, структура и свойства антифрикционных материалов на основе системы железо-медь, содержащих графит. Дис. к.т.н.-М., 1986.
- Кутяков А.А. Износостойкие и антифрикционные покрытия. — М.: Машиностроение, 1976. — 152 с.
- Rodichev, A.Y., Sytin, A.V., Barabash, V.V., Technological increase of adhesion strength between anti-friction coating and base in bimetal fluid-film bearings / Solid State Phenomena: International Conference on Industrial Engineering, ICIE-2017. Volume 265 SSP, 2017, P. 284-289.
- Welding and spraying / Hasuy A., Morigaki O., - М.: Engineering 1985. — 240 p.
- Зимон А.Д. Адгезия пленок и покрытий. М.: Химия, 1977, 345с.
- Дерягин Б.В., Кротова Н.Л., Смирла В.П. Адгезия твердых тел. — М.: Наука, 1973. - 279с.
- Gorin A. V., Rodichev A. Y., Tokmakova M. A. 2019. Adhesive strength research of film antifriction coatings. Materials Today: Proceedings, Volume 19, Part 5, 2019, P. 2329-23328.

ПРИМЕНЕНИЕ КВАЗИКРИСТАЛЛОВ В ВЫСОКОНАПОЛНЕННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ

С.А. Тюрина, Г.А. Юдин, Ю.А. Абузин, Е.В. Преображенская

Российский технологический университет «МИРЭА», Москва, Россия, tyurina_s@mirea.ru

Квазикристаллические сплавы нашли применение в качестве антифрикционных покрытий легко прирабатываемых износостойких поверхностей на деталях, работающих в условиях интенсивного износа[1].

Квазикристаллы могут наноситься на поверхность подложки такими методами как, холодное прессование квазикристаллических порошков с последующим спеканием, газоплазменное и газотермическое напыление, принудительная пропитка и пр. [2]

В работе использовался метод холодного газодинамического напыления, который является одним из наиболее перспективных методов получения квазикристаллических покрытий [3,4].

Исследуемые образцы представляли собой медные пластинки размерами 10*10*1 мм. На их поверхность, методом холодного газодинамического напыления (ХГДН), наносилась смесь мелкодисперсного (Cu-99,9% марки ПМС-1 ГОСТ 9849-86) медного и квазикристаллического порошка состава $Al_{63}Fe_{13}Cu_{24}$ с дисперсностью менее 40 мкм (70 весовых %).

Для изучения трения и износа образцы предварительно подвергались вакуумному отжигу в течение 1 часа, исходя из того, чтобы после отжига в композитных образцах оставалось значительное количество квазикристаллической фазы и при этом образовывалась прочная связь матрицы с наполнителем. Отжиг образцов осуществлялся при разных температурах: №1 - при 300⁰С, а №2 - при 500⁰С.

На рисунках (рис.1 а-г), полученных в ходе металлографических исследований, отчетливо видно, что износ образца №2 гораздо сильнее. Край борозд трения образцов однотипны. С боковых сторон отчетливо видны вырывы материала во время трения, при этом в процессе трения вырывались именно крупные частицы квазикристаллов.

Результаты трибологических испытаний (см.табл.1) показали, что глубина бороздки износа образца №1 в 9 раз, а ширина в 2 раза меньше по сравнению с образцом №2. Износ образца №1 в 8 раз меньше, по сравнению с образцом №2.

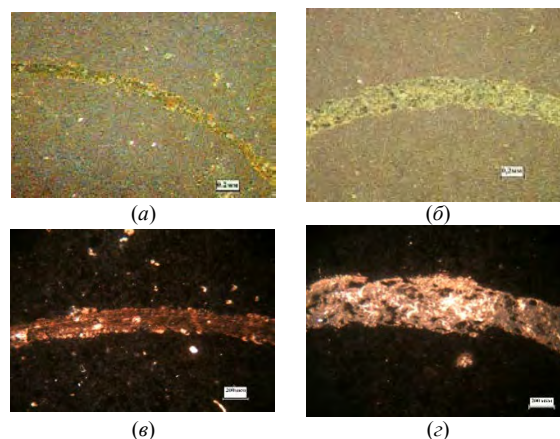


Рис.1. Образцы №1 и №2, Neophot 21(x100): (а) образец №1, светлое поле; (б) образец №2, светлое поле; (в) образец №1, темное поле; (г) образец №2, темное поле.

Таблица 1 - Результаты трибологических испытаний

Образец	Образец		Контр тело	Коэффициент трения			Пробег
	Максимальная глубина / ширина бороздки износа, мкм	Износ образца, мм ³ /Н/м		начальный	Макс.	Конечный	
1	0,5/180	4,32	<0,01	0,17	0,24	0,22	5280 об / 100 м
2	4,3/380	32,9	4,3	0,18	0,94	0,93	5220 об / 100 м

В ходе изучения процессов структуро- и фазообразования в квазикристаллических покрытиях в зависимости от технологических условий напыления с последующей термической обработкой на различных температурных режимах и проведения трибологических испытаний, полученных покрытий, по схеме «стержень-диск», нами установлено, что квазикристаллическая фаза начинает взаимодействовать с медной матрицей при температуре 300⁰С. При повышении температуры, начиная с 300⁰С в композиционных материалах наблюдается растворение квазикристаллической фазы и образование фазы Cu₉Al₄. Кроме того, за счет увеличения квазикристаллической фазы, наблюдается образование твердого раствора на основе Cu. Показано, что при 500⁰С квазикристаллическая фаза отсутствует.

Заключение

Основным результатом работы является установление того факта, что высоконаполненный композиционный материал системы 30%Cu-70% квазикристалл, полученный методом холодного газодинамического напыления с вакуумным отжигом при температуре 300⁰С обладает высокой износостойкостью. Значение коэффициента трения этого материала значительно превосходит описываемые в литературе композиционные материалы с медной матрицей. Значение коэффициента трения КМ с медной матрицей - 0,4 [5], а образца №1 - 0,24.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что высоконаполненный композиционный материал системы 30%Cu - 70%квазикристалл, полученный методом холодного газодинамического напыления и подвергшийся отжигу при температуре 300⁰С, является перспективным материалом для использования его в узлах трения.

1. Лепешев А.А., Рожкова Е.А., Карпов И.В., Ушаков А.В., Федоров Л.Ю. Физико-механические и трибологические свойства квазикристаллических покрытий Al-Cu-Fe, полученных плазменным напылением. Физика твердого тела, 2013, том 55, вып. 12
2. Захаров Б.М. О прочности сцепления покрытий, наносимых методом плазменного напыления / Б.М. Захаров, М.Г. Трофимов, Л.И. Гусева [и др.] // Порошковая металлургия. - 1970. - № 11, стр. 71-76.
3. Сильченко О.Б. О перспективах применения наноструктурных гетерофазных полифункциональных композиционных материалов в авиадвигателестроении / О.Б. Сильченко, М.В. Силуянова, В.Е. Низовцев, Д.А. Климов, А.А. Корнилов // Вопросы материаловедения. - 2018. - № 1, стр. 50-57.
4. Денисов Л.В. Обеспечение эксплуатационных свойств деталей и узлов газотурбинного двигателя локальным поверхностным легированием / Л.В. Денисов, А.Г. Бойцов, М.В. Силуянова // Вестник Самарского университета. Вестник Брянского государственного технического университета № 2 (75) 2019, стр. 19-24
5. Гращенков Д.В., Ефимочкин И.Ю., Ломов С.Б., Гончаров И.Е. Композиционный материал на основе меди. ВИАМ, 2010.

АНАЛИЗ РАЗРУШЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ТРУБНОГО ПУЧКА ОХЛАДИТЕЛЯ ПРЕСНОЙ ВОДЫ

Т.Н. Фесенко, Е.А. Дронова

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; t-fesenko@yandex.ru

На основе обобщения данных, существующих норм расчета теплообменного оборудования дана последовательная методика расчета вибрационных характеристик трубного пучка, определяющих его работоспособность. Показана кривая гидроупругой неустойчивости, по которой, с учетом определенных параметров конструкции пучка, можно определить критическую скорость потока. Расчеты произведены для конкретной конструкции

Введение

Вибрационная надежность трубного пучка теплообменного аппарата является одним из основных факторов, определяющих его долговечность и работоспособность. Основываясь на обобщении данных, дана последовательная методика расчета максимальных амплитуд колебаний труб в местах высокой концентрации напряжений. Для устойчивой работы труб в пучке необходимо отсутствие гидроупругой неустойчивости, которая наступает, когда скорость потока достигает критических значений. При достижении критической скорости потока, и при дальнейшем ее повышении амплитуда вибраций может достигать недопустимой величины. При гидроупругой неустойчивости повышение скорости потока приведет к разрушению труб. Именно поэтому критическая скорость, при которой возникает гидроупругая неустойчивость исключительно важна при проектировании теплообменников.

Цель работы – определить работоспособность охладителя пресной воды, используя известные нормы расчетов вибраций в энергетическом машиностроении, показать последовательность такого расчета.

При определении работоспособности охладителя пресной воды использованы следующие расчеты:

1. Расчет скорости потока в межтрубном пространстве.
2. Расчет вибромеханических характеристик: момент инерции поперечного сечения труб, присоединенные массы среды I и II контуров, собственные частоты трубы, логарифмический декремент колебаний.
3. Расчет амплитуд вибрации труб при турбулентном возбуждении.
4. Расчет амплитуд вибрации труб при срыве вихрей.
5. Расчет допустимых напряжений.
6. Расчет максимальных напряжений.
7. Расчет напряжений в сварных швах.
8. Расчет гидроупругой неустойчивости.

Расчеты проведены для охладителя пресной воды, схема трубного пучка которого приведена на рис. 1:

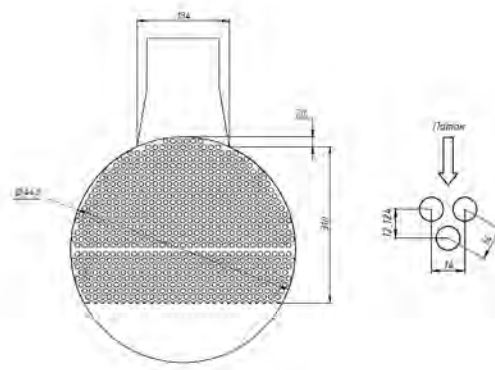


Рис.1. Схема трубного пучка охладителя пресной воды

Скорость набегающего потока для сечения входа w и скорость потока в межтрубном пространстве w_{IH} рассчитывается по формулам:

$$w = \frac{G_{II}}{3600 f \rho_{II}},$$

где f – площадь входа потока жидкости.

При поперечном шаге пучка S_I скорость в межтрубном пространстве

$$w_{IHC} = w_{IH} \frac{S_I}{S_I - d}.$$

Далее рассчитаем вибромеханические характеристики труб.

Момент инерции поперечного сечения

$$I = \frac{\pi}{64} (D^4 - d^4).$$

Полная масса единицы длины трубы складывается из массы единицы длины незаполненной трубы и присоединенных масс сред первого и второго контуров (1) [1]:

$$M = m_T + m_I + m_{II}. \quad (1)$$

Масса единицы длины незаполненной трубы:

$$m_T = \rho_T \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2).$$

Присоединенная масса среды первого контура на единицу длины трубы

$m_I = \rho_I A_I$, где A_I – объем среды первого контура на единицу длины трубы $A_I = \frac{\pi}{4} d^2$.

Присоединенная масса среды второго контура на единицу длины трубы

$m_{II} = \chi \rho_{II} A_{II}$, где A_{II} – объем среды II, вытесняемый единицей длины трубы, χ – коэффициент присоединенной массы $A_{II} = \frac{\pi}{4} D^2$. Для пучков с $S_I/D = 1,4 > 1,2$ коэффициент присоединенной массы

$$\chi = \frac{1 + (D/D_{яч})^2}{1 - (D/D_{яч})^2}.$$

Для шахматного пучка [3] $D_{яч} = 1,05 S_1$

$$m_T = \rho_T \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2)$$

Расчет собственных частоты трубы [1].

Первая собственная частота с погрешностью 10%:

$$f_1 = \frac{\lambda_1^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{EI}{M}} \sqrt{1 - \frac{T}{T^*}}$$

Влияние осевой нагрузки, избыточного давления и скорости сред определяется соотношением между параметром T и критической величиной T^* . В случае жесткой заделки трубы с двух сторон $\lambda^* = 2\pi$ и $T^* = \lambda^{*2} \frac{EI}{l^2}$.

В случае поперечного обтекания:

$$T = -T_0 + m_I w_I^2 + (1 - 2\nu_{II})(p_I A_I - p_{II} A_{II}).$$

Ввиду малой разности температур теплоносителей продольное усилие, обусловленное температурными деформациями труб, принимается $T_0 = 0$ Н.

При жесткой заделке трубы с двух сторон и 10 пролетах $\lambda_1 = 3,205$ [3].

Расчет логарифмического декремента колебаний [2].

Логарифмический декремент колебаний состоит из двух частей (2), обусловленного конструкционным и гидродинамическим демпфированием (3):

$$\delta = \delta_K \sqrt{\frac{m_T}{M}} + \delta_\Gamma \quad (2)$$

Логарифмический декремент колебаний δ_K вследствие конструкционного демпфирования определяется по графику на рис. 2.

В соответствии с рис. 2 [2] логарифмический декремент колебаний вследствие конструкционного демпфирования при 10 пролётах $\delta_K = 0,156$.

Логарифмический декремент колебаний, обусловленный гидродинамическим демпфированием (3) [2]:

$$\delta_\Gamma = \frac{1}{2} \frac{\zeta}{M f_1}, \text{ где } \zeta = \zeta_0 \frac{1}{\left[1 - \left(\frac{D}{D_{яч}}\right)^2\right]^2} \quad (3)$$

При колебаниях одиночной трубы в неограниченном объеме жидкости коэффициент гидродинамического демпфирования:

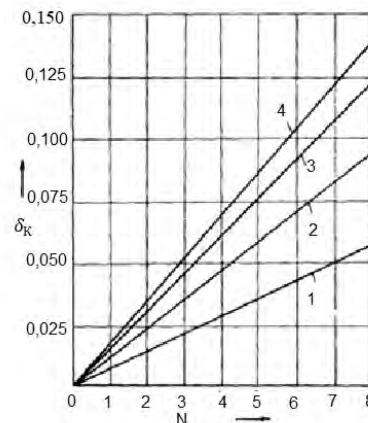


Рис. 2. Оценочная зависимость декремента колебаний δ_K для труб из различных материалов от числа пролетов N при $\frac{h}{D} \leq 0,5$: 1 – из углеродистой стали; 2 – из мельхиора; 3 – из титанового сплава; 4 – из нержавеющей стали.

$$\zeta_0 = \frac{2\pi\mu_{II}D}{\sqrt{v_{II}/\pi f_1}} - \frac{1 + \exp\left(-\frac{8\sqrt{4v_{II}\pi f_1}}{\xi_{II}W_{II}}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{8\sqrt{4v_{II}\pi f_1}}{\xi_{II}W_{II}}\right)}$$

ξ_{II} – коэффициент гидравлического сопротивления, рассчитываемый по формуле [2] $\xi_{II} = C_S Re^{-0,27}$, где C_S определяется в соответствии с геометрическими параметрами пучка S_1 и S_2 :

$$C_S = [0,44 + (1,44 - \sigma_1)] \cdot (\psi + 1)^2,$$

где $\sigma_1 = \frac{s_1}{d}$, $\sigma_2 = \frac{s_2}{d}$, $\psi = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma_2 - 1}$, $Re = \frac{w_{2пс}d}{\nu_{II}}$.

Расчет амплитуд вибрации труб при срыве вихрей

Максимальная амплитуда вынужденных колебаний труб рассчитывается по формуле [1,3]

$$y_{вихр} = \frac{C_y D \rho_{II} \frac{\bar{u}^2}{2}}{4\pi^2 f_1^2 M \sqrt{\left[1 - \left(\frac{f_p}{f_1}\right)^2\right]^2 + \left(\frac{\delta}{\pi}\right)^2 \left(\frac{f_p}{f_1}\right)^2}}, \quad (4)$$

Частота гидродинамической силы (частота срыва вихрей)

$$f_p = Sh \frac{\bar{u}}{D}$$

Коэффициент подъемной силы для первого ряда пучка C_y определяется по данным [4].

Максимальная амплитуда вибраций определяется по формуле

$$y_{max} = \sqrt{(y_{max}^{вихр})^2 + y_{турб}^{max2}}$$

Вклад турбулентных вибраций мал и его можно не учитывать.

Расчет допустимых напряжений

Согласно Н-ППУ-01[6], циклическая прочность для титановых сплавов рассчитывается с запасом по напряжениям и по циклам.

Частота возмущающей силы для расхода 100 т/ч $f_p = 214$ Гц. При полном назначенном ресурсе в 120000 часов количество циклов рабочей нагрузки:

$$N = 120000 \cdot 3600 \cdot f_p.$$

Допускаемая амплитуда напряжений [5]:

С коэффициентом запаса по напряжениям:

$$[\sigma_{aF}] = \frac{E^T \cdot e_c^T}{n_{\sigma}(0,1[N])^m} + \frac{R_c^T}{n_{\sigma}[(4[N])^{0,053 + \frac{1+r}{1-r}}]}, \quad (5)$$

С коэффициентом запаса по циклам:

$$[\sigma_{aF}] = \frac{E^T \cdot e_c^T}{(0,1 \cdot n_N[N])^m} + \frac{R_c^T}{(4n_N[N])^{0,053 + \frac{1+r}{1-r}}}, \quad (6)$$

Расчет проводился для конкретного охладителя с ПТ-7М. В соответствии с [5] коэффициенты в формулах (5) и (6) будут:

$$m = 0,8, e_{ct}^T = 0,002 \cdot Z_t^T, Z_t^T = 27,5 \%, E^T = 110 \text{ ГПа}, n_{\sigma} = 2, n_N = 4$$

$$R_c^T = \min\{R_m^T, R_{mt}^T\}$$

$$R_m^T = 444 \text{ МПа}, R_{mt}^T = 385 \text{ МПа}.$$

Сила, возникающая вследствие отрыва вихрей, изменяется по синусоидальному закону [4]. Коэффициент асимметрии цикла и принимается $r = -1$, тогда используя (5) и (6), для исследуемой конструкции допустимые напряжения $[\sigma_{aF}] = 47,17 \text{ МПа}$.

Расчет напряжений в сварных швах

Для трубы, жестко закрепленной со стороны трубной доски и свободно опирающейся в поперечной перегородке, напряжения в месте заделки:

$$\sigma = \frac{24 \cdot y_{max} \cdot E \cdot I}{l^2 \cdot W}, \quad (7)$$

Напряжения в сварном шве носят касательный характер. При эффективном коэффициенте концентрации напряжений углового шва 4,5 [6-8], напряжения, возникающие в месте приварки теплообменной трубки и трубной доски:

$$\tau = 4,5 \sigma.$$

Для исследуемой конструкции пучка, соответствии с (7) напряжения в месте заделки $\sigma = 8,98 \text{ МПа}$ и в сварном шве $\tau = 4,5 \cdot 8,98 = 40,42 \text{ МПа}$. Условия прочности для исследуемой

конструкции при расходе жидкости 100 т/ч выполняются (напряжения в сварном шве 40,42 МПа, а допускаемые 47,16 МПа).

Расчет критической скорости гидроупругого возбуждения.

Критическая скорость, соответствующая возникновению гидроупругой неустойчивости, является чрезвычайно важной характеристикой для проектировщиков теплообменников, и ее можно рассматривать как предельно допустимую скорость потока.

На рис. 3 приведены зоны устойчивости и неустойчивости, данные из различных экспериментов и расчетов для пучков с густотой S_1/D от 1.3 до 2. Выше границы кривой - зона гидроупругой неустойчивости, ниже зона устойчивости. На рис. 3 приведены результаты авторов [9-11].

Для нашего пучка рассчитаем параметры для нанесения на график рис. 3 при расходе 100 т/час:

$$\text{параметр } \frac{M \cdot \delta}{\rho_T \cdot D^2} = (0,431 \cdot 0,125) / (993 \cdot 0,012) = 0,543; \text{ параметр } \frac{w_{II}}{f_1 \cdot D} = 3,68 / (381 \cdot 0,01) = 0,966.$$

На рис. 3 для рассматриваемого пучка при расходе 100 т/час нанесена точка-звездочка. Полученный результат свидетельствует, что мы в зоне устойчивости, но с минимальным запасом.

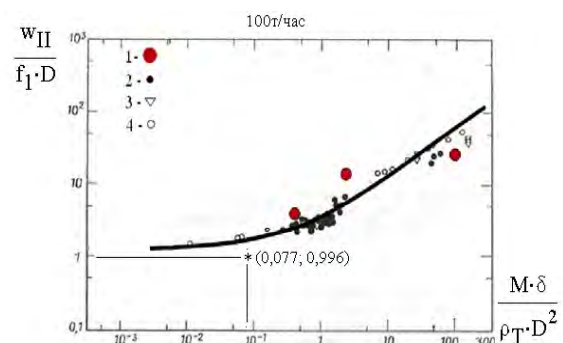


Рис.3. Зоны устойчивости и неустойчивости

Заключение

В статье определены основные вибрационные характеристики теплообменных труб охладителя пресной воды:

- показана последовательная методика расчета максимальных амплитуд колебаний труб, напряжений в месте заделки трубы в трубной доске, напряжений в сварных швах;
- определены допустимые напряжения для конкретных титановых сплавов и сварных швов;
- расчеты проведены для конкретного теплообменного оборудования, тем самым показано, что данная статья может служить методичкой для расчета работоспособности данного класса конструкций.

- 1 Парогенераторы АЭС. Расчет вибраций теплообменных труб РТМ 108.302.03-86.
- 2 Методика и зависимости для теоретического расчета теплообмена и гидравлического сопротивления теплообменного оборудования АЭС РТМ.24.031.05-72.
- 3 Методические указания. Методы оценки вибрационных характеристик трубных систем регенеративных подогревателей низкого давления и подогревателей сетевой воды РД.24.271.01-88.
- 4 Динамика конструкций гидроаэроупругих систем. /Отв. ред. С.М. Каплунов, Л.В. Смирнов/; Ин-т машиноведения им. А.А. Благовраова. – М.: Наука, 2002. – 397 с.
- 5 Нормы расчета на прочность элементов оборудования и трубопроводов корабельных атомных паропроизводящих установок с водо-водяными реакторами Н-ППУ-01.
- 6 Детали машин: Учеб. для вузов / Л.А. Андриенко, Б.А. Байков, И.К. Ганулич и др.; Под ред. О.А. Ряховского. – 2-е изд., перераб. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 520 с. – (Сер. Механика в техническом университете; Т. 8).
- 7 Дефекты и повреждения деталей и конструкций: Монография / В. М. Кушнарченко, В. С. Репях, Е. Ю. Чикров, Е. В. Кушнарченко. – Оренбург: Оренбургский госуниверситет, 2011. – 402 с.
8. Fluid Elastic coefficients in single phase cross flow: Dimensional analysis, direct and indirect experimental methods. Lagrange, R., Piteau P., Delaune, X., Antunes, J. American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessels and Piping Division (Publications) PVP 4, A028, 2019.
9. Каплунов С.М., Вальес Н.Г., Самолысов А.В., Марчевская О.А. Определение критических параметров обтекания пучка труб методом численного эксперимента // Теплоэнергетика. 2015. №8. Август. С. 57-62.
10. Chen S. S., Jendrzejczyk J. A. Experiment and Analysis of Instability of Tube Rows Subject to Liquid Cross Flow // ASME. Journal of Applied Mechanics. 1982. Vol. 104. P. 704-709.
11. Tanaka H., Takahara S., Kagava K., Ota K. Study on fluidelastic vibration of tube arrays using modal analyses technique // Mitsubishi Heavy Industries Technical Review. 1980. № 2. P. 97-107.

ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РОТОРНОЙ СИСТЕМЫ НА ОПОРАХ СКОЛЬЖЕНИЯ ПРИ СМАЗКЕ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИМИ СМАЗОЧНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

А.С. Фетисов, А.В. Корнаев

Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, Орел, Россия; fetisov57rus@mail.ru;
rusakor@inbox.ru

В статье обсуждаются результаты моделирования динамического поведения роторной системы на радиальных опорах скольжения при смазке магнитоэологическими жидкостями. Приведена структурная схема исследуемого объекта. Описано новое техническое решение. Описана модель динамики гибкого ротора и модель ротора. Приведены сводные данные по виброперемещениям ротора.

Цель

Магнитоэологические жидкости могут быть использованы в триботехнических устройствах в составе демпферов [1-3], бесконтактных муфт [4], магнитоэологических тормозов [5-6]. Актуальной областью исследований применений магнитоэологических жидкостей является использование магнитоэологических жидкостей в качестве рабочего тела подшипника скольжения. Магнитоэологические жидкости могут быть использованы для текстурирования поверхностей трения [7-8], смазочного материала упорных подшипников скольжения [9-11], смазочного материала радиальных подшипников скольжения [12-13]. Исследования в области радиальных опор скольжения, смазываемых магнитоэологическими смазочными материалами, зачастую показывают различные результаты о применимости магнитоэологических жидкостей. Эти различные выводы связаны с особенностями приложения магнитных полей к области зазора для исследуемых технических решений. В зависимости от источника тока: провода с током [14], радиально расположенной катушки [15], полюсного источника магнитного поля [16], влияние приложенного магнитного поля может быть различным. Наименее исследованным типом радиальных опор скольжения, смазываемых магнитоэологическими жидкостями, является тип подшипников с полным охватом области зазора магнитным полем. Таким образом, объектом, рассматриваемом в данном исследовании, является мехатронная система, состоящая из подшипника скольжения, магнитоэологического смазочного материала, электромагнитного актуатора, информационно-измерительной системы, преобразующей сигнал, в состав которой входит усилитель выходного сигнала ИИС (рисунок 1).

На рисунке 2 изображён подшипниковый узел, входящий в состав рассматриваемой роторной системы. В состав подшипникового узла входит подшипник скольжения, состоящий из втулки подшипника скольжения и цапфы, закрепленной на валу при помощи гайки, корпуса подшипникового узла и двух крышек, имеющих в составе электромагнитные катушки. Электромагнитные катушки отделены от

внутреннего пространства подшипникового узла немагнитной крышкой.



Рис. 1. Мехатронная роторная система

Особенностью предложенного технического решения является соосное расположение электромагнитных актуаторов и подшипника скольжения. Это техническое решение позволяет достичь нормально направленного к области зазора магнитного поля и одинаковой по модулю напряженности магнитного поля.

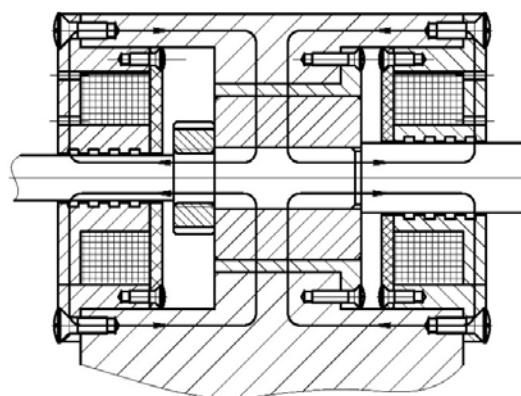


Рис. 2. Магнитоэологический подшипниковый узел

Методы

В данной работе рассматривается задача динамики ротора на опорах скольжения, смазываемых магнитоэологической жидкостью. Моделирование динамики ротора является следующим этапом после этапа линеаризации реакций опор ротора. Расчет коэффициентов жесткости и демпфирования пред-

ставлен в работе [17, 18]. В свою очередь результаты расчета жесткости и демпфирования опор основан на результатах моделирования гидродинамического течения магнитореологической жидкости в зазоре опоры скольжения. Результаты моделирования интегральных характеристик опоры скольжения представлены в работах [17]. В работах представлены выводы об увеличении момента трения подшипника вместе с возрастанием гидродинамического давления и грузоподъемности опоры.

В работе была использована модель гибкого ротора, что связано с исследованием динамики ротора в областях около первой критической частоты. Динамическое поведение ротора описывалось на основе уравнения Лагранжа 2-го рода:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial V}{\partial q_i} = Q_i, \quad (1)$$

где $\dot{q}_i$ и q_i - обобщенные координаты и скорости соответственно, T - кинетическая энергия, V - потенциальная энергия, Q_i - обобщенные силы. Подробно описание применения уравнения Лагранжа приведено в работах [19,20]. Вычислительная модель гибкого ротора описана при помощи метода конечных элементов. В модели учитывались следующие типы элементов – цилиндрический элемент вала, точечная масса, имитирующая диски на валу, элемент опоры с характеристиками жесткости и демпфирования. Общий вид ротора представлен на рисунке 3.

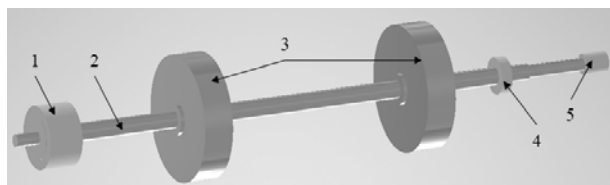


Рис. 3. Схема ротора: 1 – левый ПС, 2 – вал, 3 – диски, 4 – правый ПС, 5 – муфта

Результаты

В рамках комплексного теоретико-экспериментального исследования, часть результатов которых описаны в работах [17,18], был проведен вычислительный эксперимент по влиянию приложенного магнитного поля (фактор эксперимента – индукция приложенного магнитного поля) и частоты вращения ротора на амплитуду колебаний и собственные частоты колебаний ротора.

На рисунке 4 представлены установившиеся траектории движения ротора на частоте 4000 об/мин. Результаты моделирования показывают, что с ростом приложенного магнитного поля размах колебаний уменьшился с 80 мкм до 42 мкм.

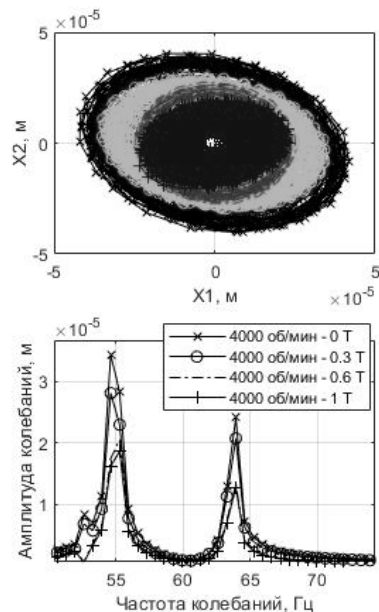


Рис. 4. Траектории вращения ротора (а) и спектр колебаний (б) на частоте 4000 об/мин

На рисунке 5 представлены результаты моделирования траекторий центра ротора на частоте 3000 об/мин.

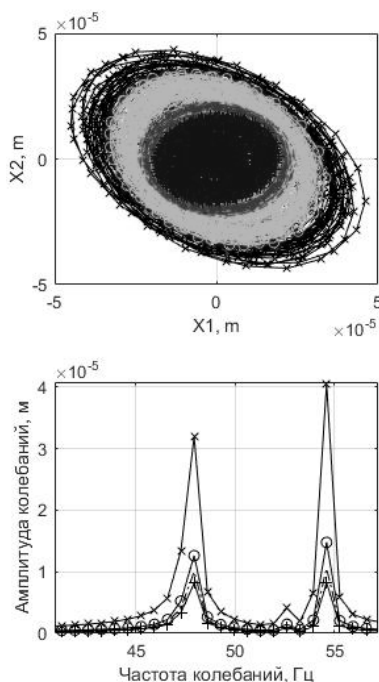


Рис. 5. Траектории вращения ротора (а) и спектр колебаний (б) на частоте 3000 об/мин

Результаты показывают аналогичное динамическое поведение роторной системы, а именно уменьшение размаха колебаний при увеличении приложенного магнитного поля. Следует отметить, что с ростом частоты вращения ротора амплитуда колебаний увеличивается.

Первая критическая частота располагается между 50 Гц (рисунок 5) и 70 Гц (рисунок 4), размах колебаний на этих частотах сопоставим.

Данные вычислительного эксперимента представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты вычислительного эксперимента

Частота вращения ротора	Приложенное магнитное поле			
	0Т	0.3Т	0.6Т	1Т
4000	80 мкм	56 мкм	46 мкм	42 мкм
3000	80 мкм	60 мкм	48 мкм	32 мкм
2000	40 мкм	28 мкм	20 мкм	18 мкм
1000	28 мкм	26 мкм	24 мкм	22 мкм

На рисунках 4 и 5 на графиках спектра присутствует 2 пика. Первый пик – оборотная частота, и второй – собственная частота колебаний ротора. На рисунке 5 видно, что колебания на собственной частоте ротора вносят больший вклад в вибрацию. Это связано с приближением к критической области, составляющей в исследуемом случае 55 Гц.

Выводы

Использование магнитореологической жидкости в качестве смазочного материала радиальных опор скольжения позволяет снизить уровень виброперемещений ротора.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90259.

- Ahmadian M. An evaluation of magnetorheological dampers for controlling gun recoil dynamics / Ahmadian, M., Poynor, J.C. // Shock and Vibration. – 2001. – Vol. 8(3-4). – P. 147-155.
- Du H. Direct voltage control of magnetorheological damper for vehicle suspensions / Du H., Lam, J., Cheung, K. // Smart Materials and Structures. – 2013. – Vol. 22(10).
- Park E.J. A performance evaluation of an automotive magnetorheological brake design with a sliding mode controller / Park, E.J., Stoikov, D., da Luz, L.F. // Mechatronics. – 2006. – Vol. 16(7). – P.405-416.
- Lammle A. Development of a new mechanic safety coupling for human robot collaboration using magnetorheological fluids // Prosedia CIRP. – 2019. – Vol. 81. – P. 908-913
- Subash A. Characterization of magnetorheological brake utilizing synthesized and commercial fluids / Subash Acharya, Radhe Shyam Saini Tak, Surya, Bhanu Singh, Hemantha Kumar // Materials Today proceedings. – 2021. – Vol. 46. – P. 9419-9224.
- Jie Wu Simulation and experimental investigation of a multi-pole multi-layer magnetorheological brake with superim-

- posed magnetic fields / Jie Wu, Hong Hu, Qingtao Li, Shuang Wang, Jian Liang // Mecatronics. – 2020. – Vol. 65. – 102314.
- Stefan G.E. Lampaert. Rheological texture in a journal bearing with magnetorheological fluids / Stefan G.E. Lampaert, Federico Quinci, Ron A.J. van Ostayen // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. –2020. – Vol. 499. – P.7.
- Krishnkant Sahu. A Simulation Study on the Behavior of Magnetorheological Fluid on Herringbone Grooved Hybrid Slot-entry Bearing / Krishnkant Sahu, Satish C. Sharma // Tribology Transactions. – 2019. – Vol. 62, Issue. 6. – P. 1099-1118.
- Lampaert S.G.E. Experimental results on a hydrostatic bearing lubricated with a magnetorheological fluid / S.G.E. Lampaert, R.A.J. van Ostayen // Current Applied Physics. – 2019. – Vol. 19– P. 1441–1448.
- Wojciech Horak. Measurement of normal force in magnetorheological and ferrofluid lubricated bearings / J.Salwiński, W.Horak// Key Engineering Materials. – (2012). – Vol. 490– P. 25-32.
- Wojciech Horak. The influence of selected factors on axial force and friction torque in a thrust bearing lubricated with magnetorheological fluid / Wojciech Horak, Józef Salwiński, Marcin Szczęch // Tribologia. – 2016. – Vol.5. – P. 51-61.
- Xiaohu Wang. Dynamic characteristics of magnetorheological fluid lubricated journal bearing and its application to rotor vibration control / Xiaohu Wang, Hongguang Li, Ming Li, Huiyu Bai, Guang Meng, Hua Zhang // jve international ltd. journal of vibroengineering. – 2015. – Vol.17 (4). – P. 1912-1927.
- Dimitrios A. Bompos CFD simulation of magnetorheological fluid journal bearings / Dimitrios A. Bompos, Pantelis G. Nikolakopoulos // Simulation Modelling Practice and Theory. – 2011. – Vol.19. – P. 1035–1060.
- Xiaohu Wang. Stiffness and Damping Properties of (Semi) Floating Ring Bearing Using Magnetorheological Fluids as Lubricant / Xiaohu Wang, Hongguang Li, Wen Lu, Guang Meng // Journal of Tribology. – 2017. – Vol. 139. – P. 11.
- Xiaohu Wang. Stiffness and Damping Properties of (Semi) Floating Ring Bearing Using Magnetorheological Fluids as Lubricant / Xiaohu Wang, Hongguang Li, Wen Lu, Guang Meng // Journal of Tribology. – 2017. – Vol. 139. – P. 11.
- H. Urreta. Hydrodynamic bearing lubricated with magnetic fluids / H. Urreta, Z. Leicht, A. Sanchez, A. Agirre, P. Kuzhir, G. Magnac // Journal of Intelligent Material Systems and Structures. – 2009. DOI: 10.1177/1045389X09356007.
- Фетисов А.С. Мехатронный подшипник скольжения, смазываемый магнитореологической жидкостью / Сборник трудов Международной научной конференции «Механика и трибология транспортных систем – 2021». – 9 с.
- Фетисов А.С. Опора скольжения с изменяемыми динамическими характеристиками: результаты моделирования и верификация полученных результатов / А.С. Фетисов, А.В. Корнаев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2021. – №2 (346). – С. 140-146.
- Adams, M.L. Rotating machinery vibration: from analysis to troubleshooting / M.L. Adams. – NY: Marcel Dekker, Inc., 2001. – 354 p.
- Зенкевич, О. Конечные элементы и аппроксимация / О. Зенкевич, К. Морган. – М.: Мир, 1986. – 318 с.

ТЕХНОЛОГИЯ РАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБОПРОВОДОВ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ АРМАТУРУ ИЗ СПЛАВОВ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ

Д.У. Хасьянова

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; dinara.khasyanova@mail.ru

В работе представлен обзор технологических процессов создания соединений трубопроводов, а также рассмотрены различные конструкции разъёмных термомеханических соединений (ТМС), их особенности и предназначения.

Соединения трубопроводов являются нагруженными элементами коммуникаций и в зависимости от их назначения и условий работы, определяется тип соединений и его эксплуатационные характеристики. Кроме того, для изделий авиационной промышленности уделяется особое внимание следующих показателей: трудоемкость изготовления элементов соединения, простота их монтажа и периодичность контроля с регламентными работами по обеспечению герметичности. [1] Оценка конструктивных характеристик соединений осуществляется по эффективному коэффициенту концентрации напряжений:

$$\beta_{соед}^{-1} = \sigma_{тр}^{-1} / \sigma_{соед}^{-1} \rightarrow 1 \quad (1)$$

Такой коэффициент в зависимости от пределов выносливости трубы в состоянии поставки, и выносливости соединения должен мало отличаться от единицы.

Исходными заготовками для ответственных трубопроводов служат бесшовные холоднотянутые и холоднодеформированные трубы из нержавеющей сталей 12Х18Н10Т, ВНС 2, титановых сплавов ОТ4, 7М. Характеристики выносливости трубопроводов из различных материалов в состоянии поставки в зависимости от методов переработки.

Наиболее распространенными разъёмными соединениями с исполнительными устройствами, переходниками, тройниками, штуцерами и являются ниппельные конструкции с накидными гайками. [2] Если герметичность соединений в процессе эксплуатации может обеспечиваться периодической подтяжкой, то предел выносливости, зависящий от условий контакта ниппеля с трубой, определяется совершенствованием конструкций. На рис. 1 схематически представлено ниппельное соединение. Согласно статистики, для таких соединений более 50% отказов приходится на места перехода развальцовкой части (3) цилиндрической трубы в коническую, т.е. в районе развальцовки трубопровода и в контактной зоне ниппеля (2) с трубой (1).

Основные причины отказов являются поперечные колебания близлежащих участков трубопровода. Если между внутренней поверхностью (рис. 1) ниппеля 2 и внешним диаметром трубы 1 существует зазор, то поперечные колебания вызывают изгиб у основания конуса 3 и фреттинг-коррозию у среза ниппеля и как следствие, низкий предел выносливости σ_{-1} такого ниппельного соединения (линия 1, рис. 2).

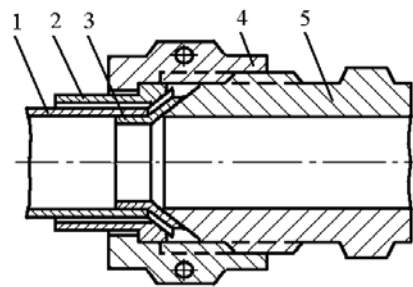


Рис. 1. Ниппельное соединение: 1 – труба; 2 – ниппель; 3 – прокладка; 4 – накидная гайка; 5 – штуцер.

Кроме того, в процессе развальцовки, у основания конуса образуется утонение и в сочетании с поперечными колебаниями трубы и неравномерностями от монтажных напряжений, способствуют к снижению прочности соединений и к возможным разрушениям.

Предел выносливости соединений в значительной степени зависит от величины зазора между поверхностями трубы и ниппеля и имеет тенденцию к повышению при уменьшении зазора и обеспечения некоторого натяга. Предел выносливости σ_{-1} паяного соединения значительно увеличивается при снижении данного зазора (линия 3, рис. 2), а при применении бесзазорной (обкатанной или обжимной) конусной прокладки 3 это увеличение для σ_{-1} составляет в пределах от 30 до 40% (рис. 2, линия 4.) [3].

Однако процесс пайки приводит к термическому воздействию на контактируемые материалы, а отсутствие зазора при обжиме способствует не только к заеданию в процессе монтажа при скольжении накидной гайки, но и приводит к определенным затруднениям выполнения стабильных моментов затяжки для обеспечения герметичности. Соединения не нашли широкого применения.

Замена традиционных конструкционных материалов на сплавы TiNi с эффектом памяти формы (ЭПФ) при изготовлении ниппельной арматуры позволяет не только существенно повысить технологичность соединений, снизить трудоемкость монтажных и регламентных работ, но и достигать предела выносливости соединений около 0,9 от предела выносливости труб в состоянии поставки. Такие характеристики обеспечиваются за счет создания бесзазорного соединения труб с данной арматурой,

обеспечивая гарантированный натяг, а также предотвращения возможности возникновения фреттинг-коррозии из-за наличия демпфирующих элементов в переходной зоне трубы и нипеля.

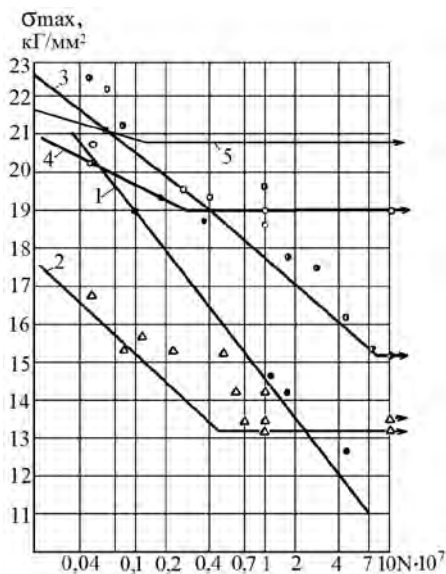


Рис. 2 Зависимость предела выносливости соединения от поперечных колебаний

Проявление в интервале эксплуатационных температур эффекта сверхупругости (СУ), [4] позволяет решать такую важную задачу, как поддержание высокой степени герметичности в результате обеспечения постоянства напряжений в резьбовой части соединения. Напряжения момента затяжки сохраняются на стабильном уровне независимо от температурных колебаний из-за разности коэффициентов термического расширения и скачков механического воздействия.

Уникальным характеристикам для такого поведения материала обязаны фазовым превращения, которые способны в узком, $(2 \div 40)^\circ\text{C}$, интервале температур и действии напряжений, осуществлять обратимые термоупругие превращения.

В зависимости от соотношения компонентов, методов переработки для конкретного сплава, интервалы температур фазовых превращений и действующие при этом напряжения существенно отличаются.

Схематически, в зависимости от действующих для данного состояния и критических напряжений материала, на рис. 3, представлены условия проявления ЭПФ, сверхупругости (СУ) и пластичности превращения скольжением.

На рис. 3 представлены случаи максимального и минимального значений критических напряжений σ_f . При минимальных значениях напряжения σ_f проявляется широкая область ЭПФ и некоторая доля СУ, но только СУ без ЭПФ не существовать не может, т.к. при температуре выше A_k и пределе текучести σ_f возникает пластическая деформация (скольжение) аустенитной B2 фазы. Если σ_f - предел текучести B2

фазы, при температурах выше A_k значительно возрастает, то при температурах до M_d не только проявляется эффект СУ, но и при реализации ЭПФ, увеличиваются генерируемые напряжения термомеханического возврата σ_R и степень восстановления формы. Повышение пределов текучести материала σ_f возможно, как металлургическим (изменением соотношения $Ti \leftrightarrow Ni$ компонентов и введением легирующих элементов), так и термомеханическими воздействиями, и фазовым наклепом.

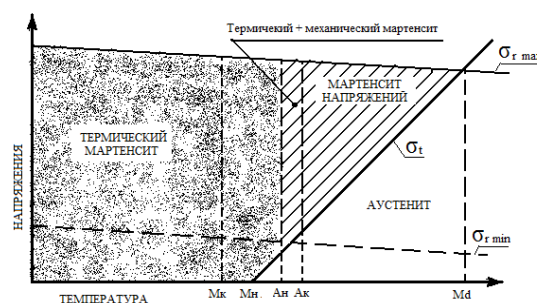


Рис. 3. Зависимость проявления свойств сплава с ЭПФ: M_d – температура, с которой начинается «смягчение» решетки аустенитной фазы, которая сопровождается термической неустойчивостью решетки к сдвиговому превращению, M_s , M_f – температуры начала и конца мартенситного превращения, A_s , A_f – температур начала и конца аустенитного превращения

С целью обеспечения высокой степени возврата формы ϵ для соединительных элементов типа муфт термомеханических соединений (ТМС), большой величины генерируемых напряжений σ_R и проявления эффектов СУ, необходимо применять сплавы с концентрацией никеля более 50,5.ат. % Ni и дополнительно легированные железом более 3.ат. % Fe. При этом разность между пределом текучести σ_f и минимальная величиной критических сдвигов σ_{fmin} должна составлять не менее 400 МПа.

Для материалов, проявляющих свойства СУ, особо следует отметить, что воздействие на аустенитную B2 фазу при изотермических условиях внешними σ_f или внутренними (от генерации) σ_R напряжениями в интервалах температур $A_s \leftrightarrow M_d$ сопровождается фазовыми превращениями некоторого объема аустенита (B2) в мартенсит напряжений (B19!!). В зависимости от интенсивности напряжений или колебания их величин изменяются (возрастает или снижается) объемы превращающегося $B2 \leftrightarrow B19!!$.

Деформирования, при температурах выше M_d происходят, как и для конструкционных материалов, скольжением. В этом случае проявления ЭПФ или СУ не наблюдается.

На основании характеристик материалов, обладающих ЭПФ и СУ по обеспечению высокой надежности неразъемных ТМС, разработаны конструкции нипельных соединений из этих сплавов [5]. Преимущества данных конструкций по сравнению со сварными или паяными соединениями состоят в том, что в результате термического влияния отсутствует заметное разупрочнение материала труб,

нет необходимости в зачистке сварных или паяных швов и проведения рентгеновского контроля.

На рис.4 представлены особенности по термомеханической установке элементов арматуры из TiNi с трубами для последующего монтажа разъемных соединений трубопроводов диаметрами от 6 до 20 мм. Внешний контур арматуры (ниппелей системы «конус по конусу» и «сфера по конусу») соответствует контуру для конструкционных материалов и позволяет применять традиционные способы монтажа. Внутренняя поверхность соответствует размерам и требованиям муфт ТМС (линия 2-0 или 2-5 на рис. 2).

Установленная при нагреве радиально деформированная арматура, осуществляет обжим поверхности труб, образуя прочный и безззорный контакт. В зоне контакта аустенитной (B2) фазы арматуры с трубой образуются упруго напряженное состояние, стимулирующее фазовые превращения с образованием мартенсита напряжений (B19!). Характерной особенностью существования B19! является его зависимость от интенсивности действующих напряжений. Если напряжения от термических (влияние коэффициента термического расширения (КТР)) или механических воздействий изменяются (возрастают ↔ снижаются), то увеличивается ↔ уменьшается содержания B19! в массиве B2 на ту величину, на которую изменяются действующие напряжения, стабилизируя на некоторой величине упруго напряженное состояние.

Наиболее высокую надежность по обеспечению герметичности, при минимально допустимых моментах затяжки, показывают разъемные соединения по внутреннему конусу с углом 24° и сферическим ниппелем.

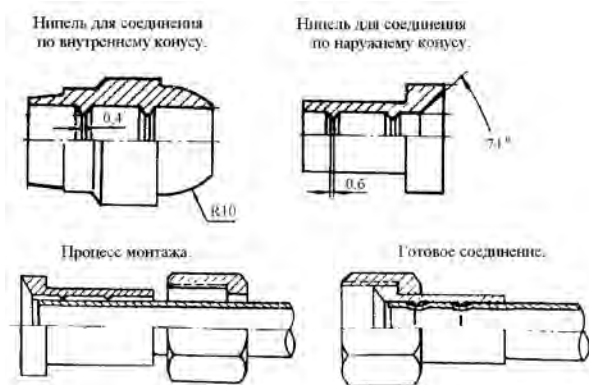


Рис. 4. Соединения ниппелей из сплава с ЭПФ

Результаты испытаний на базе 10^7 циклов по определению предела выносливости со стороны ниппеля под нагрузкой (176.5÷225,5) МПа показали, что они находятся в пределах примерно 0,95 от предела выносливости трубы в состоянии поставки.

Значительные преимущества данных соединений состоит в том, что герметичность в аналогичных условиях создается при сравнительно меньших моментах затяжки, чем для традиционной арматуры.

Особо следует отметить что σ_R - минимальные

значения критических напряжений мартенситного сдвига, достаточные для фазовых превращений типа B2↔R↔B19! и составляют (250÷300) МПа и зависят от предела текучести σ_T матрицы TiNi [6]. Например, для ниппельного соединения со штуцером из конструкционных материалов резьбовой гайкой M14, момент затяжки должен находиться в пределах 15÷30 МП [7]. В этом случае контактные напряжения составят (550÷600) МПа, что значительно превышает σ_R - напряжение фазового превращения. Исходя из вышеизложенного и подтвержденного экспериментально, для арматуры с ЭПФ, момент затяжки для разных диаметров, обеспечивающий надежную герметичность, которая составляет (5÷25) МПа [8]. Термоциклические (-60...+200)°C испытания с пульсирующим давлением и многократной (до 10 раз) переборкой с проворотом, не повлияли на прочность и герметичность соединений. Отпадает необходимость в периодических для герметичности подтяжках из-за термических от КТР колебания размеров.

Изложенные преимущества термомеханических соединений, в сочетании с высокой коррозионной стойкостью при всех климатических условиях, исключают необходимость в использовании квалифицированных операторов по монтажу, а также отсутствие термического или электромагнитного воздействия на окружающие устройства, позволяют характеризовать данные соединения как надежные и высокотехнологичные.

1. Хасьянова Д.У. Технологическое обеспечение качества изготовления муфт ТМС и сборки трубопроводов. Диссертация на соиск. уч. степ. канд. наук. МГУПИ, Москва, 2012. 115с.
2. Сапожников В.М. Монтаж и испытания гидравлических и пневматических систем летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1979. – 158 с.
3. Otsuka K., Ren X. Physical metallurgy of Ti-Ni-based shape memory alloys. Progress in Materials Science. Vol. 50, No. 5. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2004.10.001
4. Сапожников В.М., Комаров А.Н. Трубопроводы и соединения для гидросистем. – М.: Машиностроение, 1967. – 232 с.
5. Khasyanova D.U. Conditions for Operational Reliability and Tightness of Thermomechanical Joining Pipelines Using Couplers. J. Mach. Manuf. Reliab. Vol. 49 No. 2 (2020). DOI: 10.3103/S1052618820020089
6. Khasyanova D.U. Improving the Reliability of Permanent Pipeline Connections by Using the Shape Memory Effect in Thermomechanical Couplings. J. Mach. Manuf. Reliab. Vol. 48 No. 1 (2020). DOI: 10.3103/S1052618819010096
7. Elahinia M., Shayesteh Moghaddam N., Taheri Andani M., Amerinatanzi A., Bimber B.A., Hamilton R.F. Fabrication of NiTi through additive manufacturing: Progress in Materials Science. Vol. 83. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2016.08.001

ВОДОРОДСОДЕРЖАЩИЕ АЛМАЗОПОДОБНЫЕ ПОКРЫТИЯ СТАЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ, ЛЕГИРОВАННЫЕ КАРБИДОБРАЗУЮЩИМИ ПЕРЕХОДНЫМИ МЕТАЛЛАМИ И ВЛИЯНИЕ ИХ НА АНТИФРИКЦИОННЫЕ И ПРОТИВОИЗНОСНЫЕ СВОЙСТВА МАСЕЛ

М.М. Хрущов, И.А. Буяновский, В.Д. Самусенко, Ю.И. Щербаков

Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва, Россия; michel_x@mail.ru

В работе оценены антифрикционные и противоизносные характеристики инактивной, поверхностно-активной и химически активной смазочных сред при трении стали по водородсодержащим алмазоподобным покрытиям, легированным хромом, молибденом и вольфрамом. Показано, что наиболее высокие антифрикционные свойства исследуемые смазочные композиции проявили при легировании алмазоподобного покрытия молибденом.

Введение

Одним из эффективных методов повышения антифрикционных свойств масел, смазывающих узлы трения, на элементы которых наносят углеродные алмазоподобные покрытия (АПП), является легирование этих покрытий различными элементами, металлами и неметаллами, в частности, вольфрамом [1]. В то же время, в ряде публикаций приводятся сведения об эффективности легирования некоторых АПП также близкими к вольфраму по строению и свойствам хромом и молибденом. Эти три металла являются переходными и карбидообразующими. Однако оценка их способности повышать антифрикционные свойства наиболее распространённых в настоящее время водородсодержащих АПП путём их легирования в достаточной мере не проведена.

Цель работы – оценка влияния легирования водородсодержащих АПП карбидообразующими переходными металлами на смазочные свойства некоторых масел.

Материалы и методы исследования.

В качестве образцов для выполнения данной работы использованы стандартные шарики диаметром 12,7 мм и ролики диаметром 5 мм и длиной 8 мм из стали ШХ-15. Исследуемые покрытия толщиной 2,8-3,0 мкм наносили на предварительно отполированные до $Ra = 0,05-0,07$ мкм торцы роликов.

При нанесении использовали метод реактивного магнетронного распыления и металлические мишени из соответствующих металлов. В качестве реактивного газа использовали технический ацетилен, в качестве рабочего газа – очищенный аргон; особенности используемой технологии магнетронного нанесения покрытий были описаны ранее в работе [2]. В качестве легирующих элементов при нанесении покрытий использовались хром *Cr*, молибден *Mo* и вольфрам *W*.

Трибологические испытания проводились без смазочной среды и со смазочными средами – инактивное полиальфаолефиновое масло ПАО-4, поверхностно-активную композицию ПАО-4+1% (масс.) олеиновой кислоты (ОК) и химиче-

ски-активную композицию ПАО-4+2% (масс.) серосодержащей присадки ДФ-11.

Оценка антифрикционных свойств указанных смазочных композиций проводили на установке КТ-2 с модернизированным узлом трения (см. рис. 1), позволяющим проводить испытания при трении по схеме шар-торцы трёх роликов, равномерно расположенных по окружности и зафиксированным под углом $35^\circ 30'$ к оси шарика, установленного в шпинделе машины. В корпусе оправки 1 установлен сепаратор 5 с тремя пазами, профрезерованными под указанным углом. В этих пазах установлены кулачки 3, которые прижимают образцы 4 к дну пазов через прижимное кольцо 2 с усилием затягивания накидной гайки (на рис. 1 не показана).

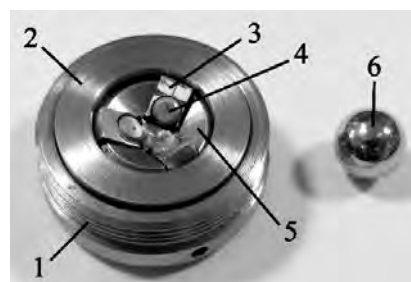


Рис. 1. Модернизированная оправка в сборе: 1 – корпус оправки, 2 – прижимное кольцо, 3 – кулачок, 4 – образец, 5 – сепаратор, 6 – изнашивающий шарик

Частота вращения шпинделя машины – 1 мин⁻¹; осевая нагрузка на узел трения – 107,8 Н. Продолжительность испытания – 60 мин. В процессе испытания регистрируется момент трения; после окончания эксперимента измеряются диаметры пятен износа на нижних образцах.

Результаты эксперимента и обсуждение

Результаты оценки антифрикционных свойств масел при трении стального шарика по АПП, легированным соответственно хромом, молибденом и вольфрамом представлены в виде зависимостей коэффициентов трения от продолжительности испытаний на рис. 2, а-в, а результаты оценки противоизносных свойств – на гистограмме значений диаметров пятен износа при этих испытаниях (рис. 3).

Как видно из рисунка 2, легирующие АПП эле-

менты оказывают значительное влияние на антифрикционные свойства смазочных сред при трении стали по покрытию.

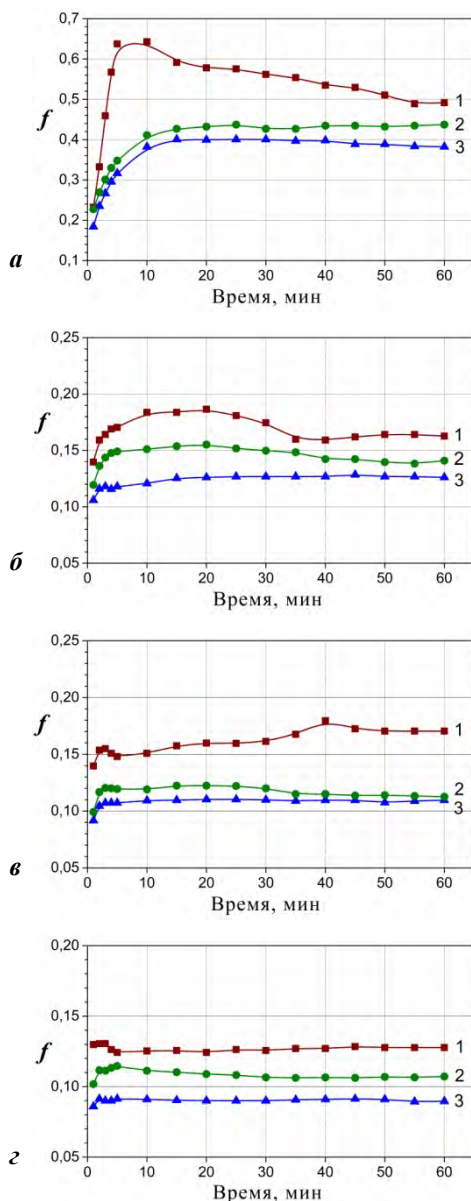


Рис. 2. Зависимости коэффициентов трения от продолжительности испытания стали по АПП без смазочного материала (а) и при смазывании маслом ПАО-4 (б), ПАО-4+2% ДФ-11 (в), ПАО-4+1% ОК (г), где покрытия легированы: 1 – Cr, 2 – W, 3 – Mo

На всех четырёх сравниваемых графиках (рис. 2, а-г), самые высокие коэффициенты трения получены при трении стали по Cr-АПП, а самые низкие – при трении стали по Mo-АПП. Наибольший антифрикционный эффект получен при испытаниях исследуемых АПП в поверхностно активной среде ПАО-4+1% ОК. В то же время, при испытании покрытий легированных W и Mo в химически активной среде ПАО-4+ДФ-11 не наблюдали столь низких коэффициентов трения, как описано в работах [4, 5].

Как видно из рис. 3, легирование АПП наиболее заметно влияет на износ в отсутствие смазочных материалов (от 483 мкм при легировании Cr до

~300 мкм при легировании W и Mo). В меньшей степени это наблюдается при испытании в смазочных

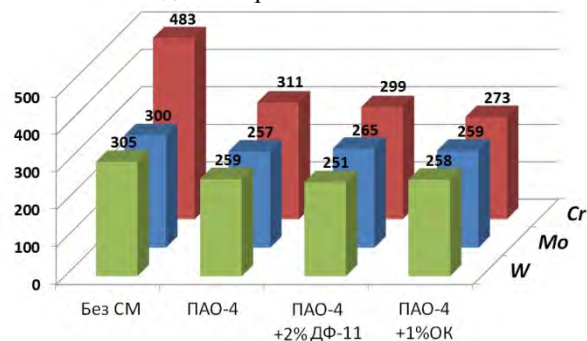


Рис. 3. Гистограмма средних значений диаметров пятен износа на торцах образцов-роликов с АПП, легированными Cr, Mo и W, испытанных в различных смазочных средах

средах, хотя и сохраняется зависимость что покрытие легированное хромом показывает худший результат по стойкость к износу.

Чем выше смазочная способность смазочных сред, тем меньше разница между износом покрытий, легированных Cr и покрытий, легированных Mo и W.

В целом в данных условиях испытаний антифрикционные свойства покрытий коррелируют с их противоизносными свойствами.

Заключение

Экспериментально установлено, что легирование Mo и W в большей степени повышает антифрикционные и противоизносные свойства АПП по сравнению с легированием этих покрытий Cr как при сухом трении, так и при трении в модельных смазочных композициях.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-08-01011-а). Благодарим М.В. Атаманова и В.И. Мирошниченко за нанесение легированных алмазоподобных покрытий, использованных при проведении трибологических испытаний.

1. Bewilogua K., Hofmann D. History of diamond-like carbon films—from first experiments to worldwide applications //Surface and Coatings Technology. 2014. Т. 242. С. 214-225.
2. Хрущов М.М. и др. Алмазоподобные нанокompозитные покрытия а-С: Н: Cr—структурное состояние, механические и трибологические свойства //Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2014. Т. 78. №. 10. С. 1257-1257.
3. Буяновский И.А., Самусенко В.Д., Щербаков Ю.И. Модернизация узла трения машины КТ-2 для оценки антифрикционных характеристик тонких покрытий при трении в режиме граничной смазки //Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85. №. 12. С. 65-68.
4. Podgornik B., Vizintin J. Tribological reactions between oil additives and DLC coatings for automotive applications //Surface and Coatings Technology. 2005. Т. 200. №. 5-6. С. 1982-1989.
5. Буяновский И.А., Большаков А.Н., Левченко В.А. Влияние на антифрикционные свойства смазочных сред легирования ориентирующих углеродных покрытий карбидообразующими элементами // Трение и износ. 2018. Т. 39. №. 5. С. 471-476.

СТРУКТУРНОЕ СОСТОЯНИЕ ЛЕГИРОВАННЫХ ХРОМОМ АЛМАЗОПОДОБНЫХ УГЛЕРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ И МЕХАНИЗМ ИХ ПОВЕРХНОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ

М.М. Хрущов¹, М.И. Петржик², О.С. Антонова^{1,3}

¹ Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия, michel_x@mail.ru

² Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

³ Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва, Россия

При электронно-микроскопическом исследовании повреждений поверхности алмазоподобных углеродных покрытий, легированных хромом, возникших в процессе испытаний на адгезионную прочность, установлено, что структурно-фазовое состояние нанокompозитной структуры покрытий влияет на морфологию и характер наблюдаемых разрушений также, как на их трибологическое поведение при сухом трении.

Комплексные исследования легированных хромом алмазоподобных углеродных покрытий, полученных методом реактивного магнетронного распыления [1–3], и особенностей их нанокompозитной структуры показали, что их строение может значительно влиять на поведение трибологических и механических свойств. Подобные исследования представляют значительный интерес, как в плане возможного практического применения, так и с точки зрения разработки научных основ материаловедения подобных нанокompозитных систем и физики их микромеханического поведения и прочности.

Целью данной работы явилось углубленное изучение влияния структурно-фазового состояния легированных хромом алмазоподобных (Cr-DLC) покрытий на особенности механических повреждений поверхности покрытий, образующихся при их испытании на адгезионную прочность, и вызывающих их механизмов поверхностного разрушения.

Технология получения покрытий Cr-DLC, экспериментальные методики и условия проведения испытаний с целью комплексного изучения их структурных, механических и трибологических характеристик были описаны ранее [1, 2]. Трибологические испытания на воздухе в условиях сухого трения проводили на шариковом трибометре для испытаний на фрикционную усталость [4], используя в качестве контртела шарик из нитрида кремния диаметром 6 мм (диапазон нагрузок $P = 0,02...0,2$ Н, база испытаний – 6000 циклов).

Исследования адгезионной прочности методом инструментального царапания проводили на адгезиометре (скретч-тестере) REVETEST (CSM Instruments, Швейцария) при нормальной нагрузке 1...60 Н, возрастающей с постоянной скоростью 60 Н/мин (путь царапания – 4,92 мм). Царапание осуществляли алмазным индентором в форме конуса (Rockwell C) с радиусом закругления вершины 200 мкм. При первоначальном исследовании морфологии полученных при проведении скретч-теста царапин использовали оптическую микроскопию, позволившую установить, что процесс разрушения при инструментальном царапании носит многостадийный характер [3]. В данной работе для этого помимо оптической применили также растровую электронную микроскопию (РЭМ), что дало возможность более подробно изучить природу поверхностных повреждений.

Исследования проводили на электронном микроскопе JSM-6610LV (JEOL, Япония).

Для изучения характеристик адгезионной прочности в данной работе нами были выбраны три типа Cr-DLC покрытий, два из которых при испытаниях на фрикционную усталость продемонстрировали высокую работоспособность, а еще одно – высокие антифрикционные свойства (обсуждение особенностей трибологического поведения этих покрытий содержится в [2]). Данные по условиям получения, толщине и составу покрытий и результаты их микромеханических испытаний приведены в табл. 1.

Результаты испытаний на адгезионную прочность покрытий Cr-DLC с нанокompозитной структурой приведены на рис. 1–3 и в табл. 2. В последней также дана краткая характеристика типов локальных повреждений, наблюдаемых в процессе испытаний, и приводятся соответствующие им характерные («пороговые») значения нормальной нагрузки L_i на алмазный индентор. Значения L_i , приведенные в табл. 2, соответствуют середине отдельных кадров оптических микрофотографий участков царапин, получаемых при увеличивающейся нормальной нагрузке L на индентор. Возникновение описанных типов поверхностных повреждений помимо результатов оптической микроскопии и РЭМ было подтверждено также данными акустической эмиссии, измерений силы и коэффициента трения; глубины погружения индентора, а также данными по изменению интенсивности характеристического $Fe K_{\alpha_1}$ -излучения материала стальной подложки вдоль центральной оси царапины, полученными при энергодисперсионном рентгеновском микроанализе.

Изучение картины повреждений на поверхности исследуемых покрытий после скретч-теста методами РЭМ и оптической металлографии позволило выявить характерные разрушения, связанные с образованием трещин и сколов в материале покрытия, отслаиванием отдельных его фрагментов, вызванным разгрузкой после прохождения индентора, износом материала покрытия путем механического истирания, процессами обнажения подложки. Анализ показал, что в зависимости от величины приложенной нормальной нагрузки для покрытий Cr-DLC можно выделить пять стадий, характеризующих процесс их разрушения: (1) стадия образования тонких трещин → (2) стадия образования на поверхно-

сти покрытия локальных сколов (или (см. ниже) системы разнонаправленных тонких трещин) → (3) стадия образования множественных трещин в объеме покрытия → (4) стадия локального вскрытия под-

ложки, связанного с уменьшением толщины (истиранием) покрытия в процессе трения → (5) полное вскрытие (обнажение) подложки [3].

Таблица 1. Условия нанесения, толщина, химический и фазовый состав, размеры областей когерентного рассеяния (ОКР) хрома и нанотвердость покрытий Cr-DLC.

№ обр.	Условия напыления	[C], ат.%	Фазовый состав	D_{Cr} , нм	H , ГПа
1	Ar+C ₂ H ₂	80,4	Cr+Cr ₂₃ C ₆ +a-C:H	8,1	10
2	Ar+C ₂ H ₂ +N ₂ (80:20)	64,3	Cr+Cr ₂₃ C ₆ +a-C:H	8,7	12,9
3	Ar+C ₂ H ₂ +N ₂ (20:80)	27,4	Cr+Cr ₇ C ₃ +CrN+a-C:H	13,4	29,1

Таблица 2. Результаты испытаний покрытий на адгезионную прочность.

№ обр.	1	2	3	Характер разрушения покрытия [5]
Стадия поверхностного повреждения	Пороговая нагрузка L_i , Н			
(1) образование тонких трещин	2,7	2,2	2,9	К
(2) образование локальных поверхностных сколов и/или системы тонких трещин различной направленности	6,5	6,5	6,7	К
(3) образование множественных трещин в объеме покрытия	16,1	19,4	9,1	К
(4) локальное вскрытие подложки	33,3	41,1	15,9	К → А
(5) полное вскрытие (обнажение) подложки	52,1	50,1	41,9	А

Примечание. Приводимые пороговые значения нагрузки соответствуют различным типам поверхностного повреждения; тип разрушения: К – когезионный, А – адгезионный, К → А – переход от когезионного к адгезионному разрушению.

Из данных микроскопического исследования этих повреждений следует, что если первоначально, на стадиях (1)–(3), процесс разрушения ограничен объемом покрытия и носит, согласно предложенной в [5] классификации, «когезионный» характер, то на стадиях (4)–(5) в него вовлечены, как покрытие, так и граница раздела и материал основы, и он приобретает «адгезионный» характер. По этой причине пороговое значение нагрузки L_i на индентор, связанное с началом локального истирания подложки, можно рассматривать как критическое для перехода от когезионного к адгезионному (К→А) типу разрушения.

На рис. 1 и 3 представлены электронно-микроскопические изображения отдельных участков царапин на образцах №№ 1 и 3 (оптические снимки соответствующих участков приводятся в [3]), а на рис. 2 оптические микрофотографии царапины на образце № 2. Сравнение оптических фотографий образцов №№ 1 и 2 показывает, что наблюдаемая картина поверхностных повреждений при скретч-тесте для них, в целом, носит сходный характер и существенно отличается от наблюдаемой в образце № 3. Использование РЭМ позволило авторам изучить характерные особенности поверхностного разрушения, выявить детали, невидимые при малых увеличениях, и предложить уточненное описание многостадийного процесса разрушения покрытий Cr-DLC при инструментальном царапании.

Здесь и далее будем вести речь исключительно об особенностях морфологии поверхностных трещин, развивающихся при инструментальном царапании с постоянно увеличивающейся нагрузкой, не рассматривая подробно физику и механизмы процессов, вызывающих их развитие, как, например, в обзоре [6]. Вместо этого будем давать краткое описание характера повреждений и приводить английское обозначение, используемое для них в стандарте ASTM C1624-05 [7].

Так, в покрытиях №№ 1 и 2, полученных в чи-

стом ацетиле или богатой им атмосфере и имеющих твердость порядка 10 ГПа, на стадии (1) поверхностного разрушения, связанной с образованием одиночных тонких трещин, при прохождении индентора возникают боковые трещины (*lateral cracks*), идущие вдоль краев (берегов) царапины (рис. 1,а и 2,а). В тех же условиях в покрытии № 3, полученном в среде с малым содержанием ацетилена и обладающем твердостью ~ 30 ГПа (рис. 3,а), возникают вначале прямые шевронные (*forward chevron cracks*, показаны стрелками), затем и дуговые трещины растяжения (*arc trailing cracks*), обусловленные наличием поля растягивающих напряжений, действующих позади движущего индентора.

При росте нагрузки на индентор и переходе к стадии (2) в покрытиях №№ 1 и 2 возникают направленные вперед по направлению движения индентора локальные сколы материала покрытия (рис. 1,б и 2,б), не достигающие границы с подложкой (т.е. разрушение носит когезионный характер). В случае покрытия № 3, полученного в смеси, где ацетилена мало, на стадии (2) наряду с существованием вызванных растягивающими напряжениями дуговых трещин, начинается формирование имеющих большее раскрытие дугообразных трещин, вызванных сжимающими напряжениями перед движущимся индентором и образованием за счет этого перед ним валика пластически деформированного материала (*conformal and buckling cracks*) (рис. 3,б).

На стадии (3), наблюдаемой при нагрузках более 10 Н, в покрытиях №№ 1 и 2 (рис. 1,в и 2,в), наряду с возникновением локальных сколов, ориентированных под углом 45° к оси царапины, в ее средней части начинается образование множественных параллельных тонких трещин, расстояние между которыми по данным РЭМ составляет ~ 2 мкм.

Формирующиеся на этой стадии локальные сколы имеют ориентацию не только вовне, но и внутрь царапины. На этой и следующей стадиях за

ней стадии на царапаемой поверхности в результате сочетанного действия процессов трещино- и сколообразования возникает достаточно сложный рельеф, наблюдаемый на рис. 1, в и 3, в.

В покрытии № 3, полученном при малом содержании ацетилена (20 об. %) и обладающем высокой нанотвердостью, на стадии, соответствующей образованию множественных трещин, наряду с образованием таких трещин под действием сжимающих напряжений и пластической деформации мате-

риала покрытия и основы перед движущимся индентором возникают локальные отслаивания небольших фрагментов покрытия (*buckle spallations*), и в результате материал покрытия оказывается сильно фрагментирован (рис. 3, в).

Указанные выше существенные различия картины поверхностных разрушений покрытий Cr-DLC сохраняются вплоть до стадии (4), характеризующей вскрытием локальных участков подложки.

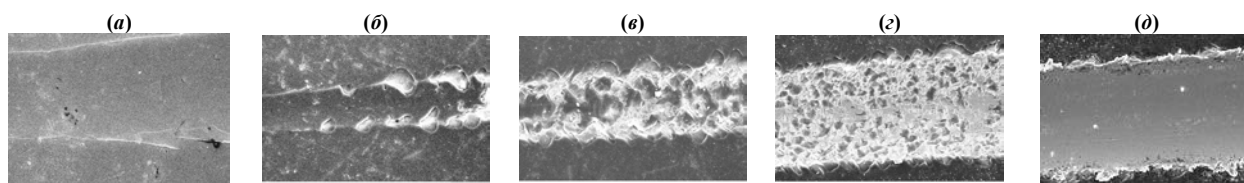


Рис. 1. Изображения во вторичных электронах характерных разрушений при скретч-тесте в покрытиях Cr-DLC, полученных распылением в ацетиле (обр. № 1). Значения L_i для образцов № 1–3 в табл. 2 соответствуют середине отдельных кадров для стадий: (а) – с номерами $i = 1$; (б) – 2; (в) – 3; (г) – 4 и (д) – 5, соответственно.

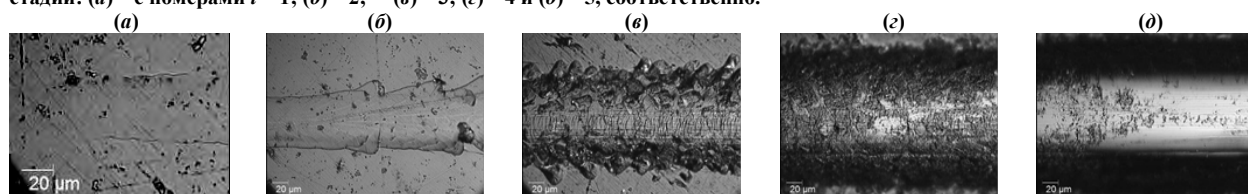


Рис. 2. Оптические микрофотографии разрушений в покрытиях, полученных в смеси 80 об. % C_2H_2 –20 об. % N_2 (обр. № 2).

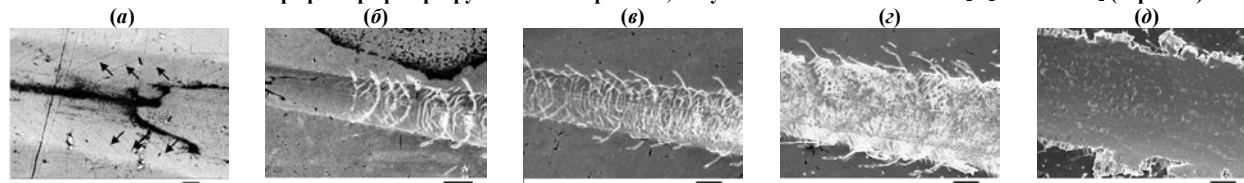


Рис. 3. Изображение во вторичных электронах разрушений в покрытиях, полученных в смеси 20 об. % C_2H_2 –80 об. % N_2 (обр. № 3).

В покрытиях № 1 и 2 при росте нагрузки сложный поверхностный рельеф, возникший в процессе царапания, продолжает эволюционировать за счет вновь образующихся сколов материала покрытия, и так продолжается до того момента, пока на отдельных участках царапины, в средней ее части, не возникнут места, полностью свободные от покрытия (рис. 1, г и 2, г). На остальной же поверхности следа индентора на этой стадии поверхностного разрушения участки с частично сколовшимся покрытием все еще видны и практически полностью исчезают лишь в начале стадии (5) (рис. 1, д и 2, д).

В покрытии № 3, твердость которого в три раза выше, чем у образца № 1, на стадии (4) покрытие на поверхности следа царапины становится еще сильнее фрагментированным за счет дальнейшего увеличения плотности трещин и появления следов протаскивания локально отслоившихся под действием напряжений сжатия фрагментов покрытия. Сформировавшаяся на этом этапе сильно фрагментированная структура состоит из ячеек разного размера, имеющих почти квадратный габитус и по-разному ориентированных относительно оси царапины, образованных сеткой пересекающихся сквозных разнонаправленных дуговых трещин, раскрытие которых приводит к нарушению адгезионной связи покрытия

и подложки. На микрофотографии, снятой на стадии (4) (см. рис. 3, г), хорошо видны также вызванные действием сжимающих напряжений, пластически деформирующими материал основы перед движущимся индентором, характерные дугообразные сквозные трещины (*buckling cracks*), которые выходят за края следа царапины. Хорошо видно, что отдельные утратившие связь с основой фрагменты покрытия при прохождении индентора сдвигаются к краям царапины. Наконец, на стадии (5) покрытие № 3 оказывается практически полностью удалено. От него остаются отдельные небольшие фрагменты на дне царапины и навалы, состоящие из материала разрушившегося покрытия, на ее краях (рис. 3, д). Образование таких навалов не дает возможности корректно измерить ширину царапины $2b$ при соответствующей этой стадии пороговой нагрузке L_5 , необходимую для определения адгезионной прочности покрытия, как отношение по методу, предложенному авторами [8], оценивающими ее, как $2L_5/\pi b^2$.

В этой связи в качестве параметров, характеризующих адгезионную прочность покрытий, чаще рассматривают пороговые (критические) нагрузки, при которых происходит их полное разрушение, отслаивание или отрыв от подложки. Оценку адгезионной прочности по методике [8] используют существенно реже.

В отличие от рассмотренных выше, в настоящей работе значения пороговых нагрузок царапания были получены нами для ряда покрытий, отличающихся друг от друга, как фазовым составом, так и характерным размером структурных неоднородностей (табл. 1). Как показано ранее [1-3], эти различия приводят к тому, что поведение механических и трибологических свойств соответствующих покрытий существенно различается. На гистограммах, приведенных на рис. 5, представлены данные трибологическим характеристикам и величине пороговых нагрузок для всех пяти стадий процесса поверхностного разрушения, наблюдаемых в покрытиях Cr-DLC (данные по нанотвердости и размеру ОКР приведены в табл. 1).

Из анализа приведенных гистограмм следует, что покрытия Cr-DLC, полученные реактивным магнетронным распылением в атмосфере ацетилена или богатой им смеси ацетилен-азот с содержанием углерода от 80 до 64 ат. %, имеют алмазоподобную углеродную матрицу, армированную частицами хрома размером 8–10 нм и его карбидов нанометро-

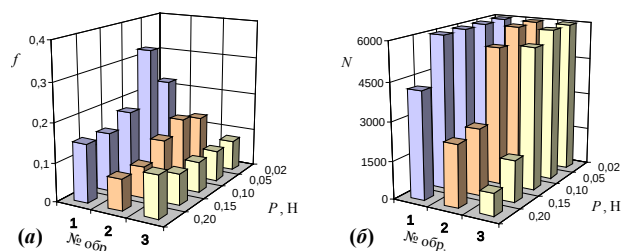


Рис. 4. Результаты исследования покрытий: (а) – зависимость коэффициента трения f и (б) – числа циклов N , при котором возникает нестабильность силы трения от нагрузки P ; (в) – пороговые нагрузки L_i для стадий (1)–(5) образования поверхностных повреждений.

Выводы.

На основе электронно-микроскопического изучения морфологии повреждений поверхности покрытий Cr-DLC при инструментальном царапании впервые показано, что при изменении структурно-фазового состояния покрытия меняется как морфология поверхности царапин, так и механизм поверхностного разрушения, определяющий эту морфологию. Различия касаются особенностей повреждений, как на начальных стадиях испытаний, связанных с образованием тонких трещин, так и на позднейших этапах, когда идет развитие множественных трещин, формирование сложного рельефа поврежденной поверхности, фрагментация покрытий и переход от когезионного к адгезионному разрушению.

Установлено, что обнажение поверхности подложки на последнем этапе обусловлено не постепенным истиранием материала покрытия, а процессами когезионного скалывания и сильной фрагментацией при пересечении, объединении и раскрытии множественных трещин, обусловленных напряжениями растяжения и сжатия.

Полученные результаты показывают, что характером поверхностных разрушений при испытаниях методом инструментального царапания, а также трибологическим поведением легированных хромом алмазоподобных углеродных покрытий можно целенаправленно управлять, меняя структурно-фазовое состояние за счет

вого размера [2]. Они характеризуются значениями нанотвердости ~ 10 –13 ГПа, более высокими, чем покрытия, полученные в смесях с низким содержанием ацетилена, значениями коэффициента трения и высокой работоспособностью (сопротивлением фрикционной усталости) в условиях тяжело нагруженного фрикционного контакта (см. рис. 4 а и б). К тому же, как показывают данные скретч-тестов (рис. 4, в), они имеют более высокие значения критических (пороговых) нагрузок для всех стадий поверхностного разрушения, чем покрытия Cr-DLC, полученные при содержании ацетилена в смеси ацетилен-азот 20 об.%. В силу этого можно говорить об их более высокой адгезионной и когезионной (соответствующей переходу от когезионного к адгезионному разрушению покрытия) прочности.

Рассуждая аналогично можно заключить, что покрытие № 3, полученное в смеси с 20 об.% C_2H_2 , обладает более высокими антифрикционными свойствами, чем покрытия №№ 1 и 2, нанесенные магнетронным распылением хрома в реактивных смесях, богатых ацетиленом.

изменения технологических условий, в частности, состава реактивной атмосферы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-09-01011).

1. Хрущов М.М., Атаманов М.В., Марченко Е.А. и др. Алмазоподобные нанокompозитные покрытия $a-C:H:Cr$ – структурное состояние, механические и трибологические свойства // Изв. РАН. Сер. физич. 2014. Т. 78. № 10. С. 1257-1265.
2. Хрущов М.М., Марченко Е.А., Левин И.С. и др. Особенности структуры и трибологическое поведение хромуглеродных покрытий, полученных магнетронным распылением // ФММ. 2019. Т. 120. № 2. С. 219-224.
3. Khrushchov M.M., Marchenko E.A., Petrzikh M.I. et al. The effect of structure on tribological behavior of chromium-carbon coatings obtained by plasma-assisted physical vapor deposition // J. Phys.: Conf. Series. 2018. V. 1121. 012017.
4. Комбалов В.С. Методы и средства испытаний на трение и износ конструкционных и смазочных материалов: Справочник. М.: Машиностроение. 2008. 384 с.
5. Bull S.J. Failure mode maps in the thin film adhesion test // Tribol. Intern. 1997. V. 30. P. 491-498.
6. Chen Z., Wu L.Y.L. Scratch resistance of protective sol-gel coatings on polymeric substrates // Tribology of Polymeric Nanocomposites: Friction and Wear of Bulk Materials and Coatings / Ed. by K. Friedrich, A.K. Schlarb. Amsterdam: Elsevier. 2008. P. 325-353.
7. ASTM Standard C1624-05. Standard Test Method for Adhesion Strength and Mechanical Failure Modes of Ceramic Coatings by Quantitative Single Point Scratch Testing. ASTM Intern. 2011. 29 p.
8. Ahn J., Mittal K.L., MacQueen R.H. Hardness and adhesion of filmed structures as determined by scratch technique // Adhesion Measurement of Thin Films, Thick Films, and Bulk Coatings: ASTM STP 640 / Ed. by K.L. Mittal. Philadelphia: ASTM. 1978. P. 134-157.

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ УПРУГОГО ЦИЛИНДРА И РЕГУЛЯРНО ШЕРОХОВАТОЙ ПОВЕРХНОСТИ

И.Ю. Цуканов, И.В. Шкалей

Институт проблем механики им А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия; ivan.yu.tsukanov@gmail.com

Представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований контактных характеристик при взаимодействии упругого цилиндра и жесткой регулярно-шероховатой поверхности для оценки критических параметров неровностей, приводящих к потере компактности области контакта.

Цель

Управление силой адгезии в упругом контакте поверхностей является актуальной проблемой робототехники и создания микроэлектромеханических устройств (МЭМС). Одним из основных факторов, влияющих на усилие отрыва – основную интегральную характеристику адгезионного взаимодействия упругих тел, является шероховатость взаимодействующих поверхностей. Известно, что молекулярная и электростатическая компоненты адгезии зависят от зазора между поверхностями и площади фактического контакта. Экспериментальные и теоретические исследования [1, 2] показали, что существует сочетание высотных и шаговых параметров шероховатости, при которых достигается максимальная сила отрыва поверхностей в неконформном контакте (например, индентора и плоской поверхности). Этот эффект связывают с переходом от компактной области контакта, предполагающей, что в процессе внедрения (или смятия) индентора шероховатость находится в состоянии полного контакта с контртелом, к дискретным пятнам при увеличении высотных параметров шероховатости [3]. Эффект увеличения адгезии сильнее проявляется для поверхностей с регулярным микрорельефом, вследствие однородности высот неровностей. Целью работы является экспериментальное и теоретическое исследование контактных характеристик при взаимодействии упругого цилиндра и жесткой регулярно-шероховатой поверхности для оценки критических параметров неровностей, приводящих к потере компактности области контакта и, следовательно, к падению силы отрыва в сопряжении.

Материалы и методы

Экспериментальные исследования проведены на сканирующем нанотвердомере «Наноскан-4D» (ТИСНУМ, Россия). В качестве индентора использовался усеченный цилиндр из силикона с модулем Юнга $E = 2,1$ МПа. Размеры цилиндрического индентора составляли: $D = 12$ мм; $H = 8,5$ мм. В качестве образцов (контртел) использовались стандартные стальные образцы шероховатости для горизонтального фрезерования. Шероховатость образцов представляла собой двумерный квазирегулярный микрорельеф, близкий к синусоидальной волнистости. Геометрические параметры микрорельефа образцов приведены в табл. 1. В качестве эталонного (гладкого) образца использовалась пластинка из

кварцевого стекла; при этом реализовывался контакт поверхностей согласно теории Герца.

Таблица 1. Параметры микрорельефа образцов

Среднее арифметическое отклонение (Ra), мкм	Шаг между выступами λ , мкм	Высота рельефа (max) 2Δ , мкм	$2\Delta/\lambda, 10^{-3}$
0,8	500	2,8	5,6
1,6	790	7,1	9
3,2	1100	10,3	9,36

Индентор сжимался при линейно увеличивающейся силе до 150 мН (рис. 1). Погонная нагрузка при этом составляла $P = 17,6$ Н/м. Скорость внедрения соответствовала упругому режиму.

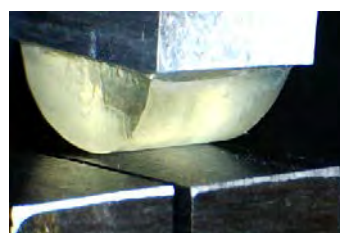


Рис. 1. Изображение индентора в контакте с образцом шероховатости

Результаты испытаний были получены при обработке зависимостей нагрузки от сближения тел с помощью встроенного ПО.

Результаты и их обсуждение

На рис. 2 представлены полученные зависимости «нагрузка–внедрение» для исследуемых образцов.

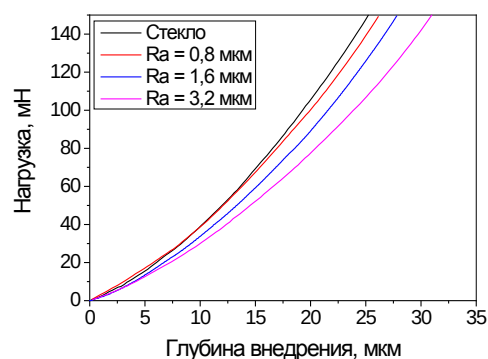


Рис. 2. Кривые «нагрузка–внедрение» для исследуемых образцов

Кривые, приведенные на рис. 2, показывают, что с увеличением отношения $2\Delta/\lambda$ требуемая нагрузка достигается при большем внедрении, что свидетельствует об уменьшении жесткости контакта с ростом высоты профиля и уменьшением среднего шага между неровностями. Данный результат соответствует дискретной конфигурации контакта [4].

Интересно отметить, что кривая, соответствующая минимальному отношению $2\Delta/\lambda$ ($Ra = 0,8$ мкм) пересекает кривую для гладкой поверхности (стекло) в нескольких точках. С помощью вычитания значений пересекающихся кривых и удаления тренда получена колебательная (флуктуационная) составляющая кривой, связанная с шероховатостью поверхности (рис. 3).

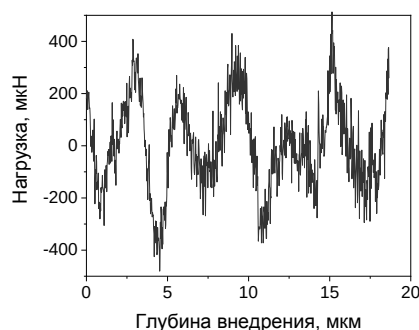


Рис. 3. Флуктуационная составляющая кривой «нагрузка–внедрение» для образца с $Ra = 0,8$ мкм

Анализ автокорреляционной функции флуктуационной составляющей нагрузки показал, что эта составляющая имеет периодическую компоненту с периодом по глубине внедрения близким к 2Δ . Это означает, что на участке пересечения кривых, соответствующих гладкому образцу (теория Герца) и шероховатому ($Ra = 0,8$ мкм) наблюдается полный контакт индентора и неровностей поверхности.

Для теоретического определения критических параметров регулярного микрорельефа, при которых наблюдается полный контакт цилиндрического индентора и выступов шероховатости может использоваться решение плоской задачи о контакте волнистого цилиндра и упругой полуплоскости. Схема задачи приведена на рис. 4.

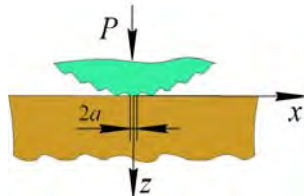


Рис. 4. Схема задачи о контакте волнистого цилиндра и упругой полуплоскости

Распределение контактных давлений, полученное при решении задачи, определяется следующей зависимостью [3]:

$$p(x) = \frac{E^*}{2R} \sqrt{a^2 - x^2} + \frac{2\pi E^* \Delta}{a\lambda} \sqrt{a^2 - x^2} \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k J_{2k+1} \left(\frac{2\pi a}{\lambda} \right) U_{2k} \left(\frac{x}{a} \right) \quad (1)$$

где E^* – приведенный модуль упругости контактирующих тел [4]; a – полуширина области контакта; R – радиус индентора; Δ , λ – амплитуда и период синусоидальной волнистости ($z(x) = \Delta(1 - \cos(2\pi x/\lambda))$); $J_k(x)$ – функция Бесселя 1-го рода; $U_j(x)$ – многочлен Чебышева 2-го рода.

Переход от компактной к дискретной области контакта достигается при нарушении условия $p(x) > 0$; $-a < x < a$. Анализ выражения (1) показывает, что при этом критическое соотношение между параметрами волнистости и радиусом индентора составляет:

$$\Delta < \frac{\lambda^2}{\pi R}. \quad (2)$$

Для обеспечения компактной области контакта вне зависимости от нагрузки необходимо следующее более жесткое условие:

$$\Delta < \frac{\lambda^2}{4\pi^2 R}. \quad (3)$$

Сравнение теоретических расчетов с проведенными экспериментальными исследованиями показало, что для реальной шероховатой поверхности условие сохранения компактной области контакта значительно жестче, чем для идеализированной волнистости, что объясняется наличием гармоник более высокого порядка. При этом условие (3) дает более адекватную оценку критических параметров.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-01-00400 А.

1. Guduru P.R. Detachment of a rigid solid from an elastic wavy surface: Theory // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 2007. V. 55. Pp. 445–472.
2. Briggs G.A.D., Briscoe B.J. The effect of surface topography on the adhesion of elastic solids // Journal of Physics D: Applied Physics. 1977. V. 10. No. 18. Pp. 2453–2466.
3. Цуканов И.Ю. Упругий контакт индентора с волнистой поверхностью в условиях плоской и пространственной задач / XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики: сборник трудов. Т. 3. Уфа: РИЦ БашГУ, 2019. С. 1013–1015.
4. Горячева И.Г. Механика трения. М.: Наука, 2001. 478 с.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫМИ ОПЕРАЦИЯМИ РОБОТОВ С ПНЕВМОПРИВОДОМ С УЧЁТОМ КОНФИГУРАЦИИ РАБОЧЕГО ПРОСТРАНСТВА

В.И. Чижиков, Е.В. Курнасов

Российский технологический университет «МИРЭА», Москва, Россия; vichizhikov@gmail.com

Работа направлена на решение задачи управления позиционированием рабочих органов пневматических подсистем различного технологического оборудования при выполнении погрузочно-разгрузочных операций с учётом конфигурации рабочего пространства. Предложена методика определения значений параметров устройств управления пневмоприводами, обеспечивающая заданные отклонения от требуемых значений показателей качества. Система управления реализуется на основе нечеткой логики. Показано, что регулирование режимов работы приводов в конечных и промежуточных положениях, построенных на нечёткой логике, возможно осуществить путём управляемого дросселирования потока.

Планированием маршрута (пути) движения робота называется процесс поиска такой последовательности конфигураций, соединяющей начальное положение и заданное конечное, что при перемещении робота по ней, не возникает столкновений с препятствиями. Существующие алгоритмы перемещения схвата робота предполагают, как правило, исключение столкновений на планируемом маршруте и минимизацию времени перемещения из начальной точки в конечную. Широкое применение для обеспечения погрузочно-разгрузочных операций получили дискретные пневмоприводы, выполненные обычно с системой управления по схеме путевой автоматики [1-4]. Актуальность темы обусловлена необходимостью решения задачи программного управления позиционированием схвата робота, оснащённого пневмоприводами [5-8], в конфигурационном пространстве, топология которого является функцией времени, с целью обеспечения заданных показателей качества технологического процесса при погрузочно-разгрузочных операциях. Роботы, оснащённые пневмоцилиндрами и поворотными камерами, в свободном конфигурационном стационарном пространстве реализуют циклограмму, соответствующую бесконфликтному движению к финальной конфигурации кинематической цепи при выполнении условий декомпозиции по прокладке маршрута. Свободное конфигурационное пространство может меняться в реальном времени, при этом задача достижения финальной конфигурации также требует решения. В этом случае рабочее пространство становится функцией времени, и получаем систему с нечёткой логикой управления, в которой меняется расписание включений приводов, подвижные элементы которых совершают предписанные конструкцией привода перемещения. Введём понятие *конфигурационного* пространства Q , в котором содержатся все возможные конфигурации манипулятора:

$$Q = \{q\}.$$

Введём понятие *рабочего* пространства W . Оно представляет собой множество точек, принадлежащих как самому манипулятору, так и области его досягаемости вместе с находящимися внутри пре-

пятствиями:

$$R(q) \subset W, O \subset W,$$

где $R(q)$ – пространство, занятое роботом, O – пространство, занятое препятствиями.

Рабочее пространство может быть двумерным $W=R^2$ и трёхмерным $W=R^3$, которым соответствуют структурные схемы манипуляторов. Запрещённое конфигурационное пространство, соответствующее столкновению робота с препятствием, определяется как совокупность конфигураций, соответствующих ненулевому пересечению множеств $R(q)$ и O :

$$Q_x = \{q \in Q | R(q) \cap O \neq \emptyset\},$$

откуда свободное конфигурационное пространство можно выразить

$$Q_0 = Q \setminus Q_x.$$

Уровни предлагаемой структуры управления приводами пневмосистемы представим в следующей последовательности. Первый уровень – локальное аппаратное управление приводами; второй – элементарные программные операции; третий – операции с учетом информации о среде с элементами методов искусственного интеллекта. Для решения вопроса управления линейным и угловым перемещением использован ПИД-регулятор. Использование ПИД-регулятора для создания управляющего воздействия на пневмопривод может позволить добиться необходимых показателей качества переходного процесса, что является одной из задач таких систем.

Математическое описание закона ПИД управления имеет вид

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d de/dt,$$

где $e(t)$ – сигнал ошибки, полученный в результате разности входного воздействия и обратной связи, $u(t)$ – управляющее воздействие ПИД-регулятора, K_p , K_i , K_d – коэффициенты пропорциональной, интегральной, и дифференциальной составляющей.

Предлагается методика определения значений параметров устройств управления пневмоприводом, обеспечивающих заданные отклонения от требу-

мых значений показателей качества [9]. Принципы реализации управления для пневматического привода можно проследить на основе исследуемых зависимостей от времени перемещения $x(t)$ и скорости перемещения $\dot{x}(t)$ рабочего органа. Для первого уровня управления воспользуемся моделью пневмопривода, описываемого системой уравнений:

$$\begin{cases} m \frac{d^2 x}{dt^2} = p_1 F_1 - p_2 F_2 - p_a (F_1 - F_2) - F_{tr} \\ \frac{dp_1}{dt} = \frac{k f_1 \sqrt{RT_m}}{F_1 (x_{01} + x) \sqrt{\varepsilon_1}} \sqrt{p_m^2 - p_1^2} - \frac{k p_1}{(x_{01} + x)} \frac{dx}{dt} \\ \frac{dp_2}{dt} = \frac{k f_2 \sqrt{RT_m}}{F_2 (x_{02} + x) \sqrt{\varepsilon_2}} \left(\frac{p_2}{p_m} \right)^{\frac{k-1}{k}} \sqrt{p_2^2 - p_a^2} - \frac{k p_1}{(S + x_{01} - x)} \frac{dx}{dt} \end{cases}$$

где p_1 и p_2 – давление в полостях пневмоцилиндра, Па; $k=1,4$ – показатель адиабаты; f – площадь проходного сечения трубопровода, м²; R – газовая постоянная, Дж/(кг·К); T – абсолютная температура газа, К; F – эффективная площадь поршня, м²; x – координата положения поршня, м; x_0 – приведенная координата, характеризующая объем вредного пространства, м; ζ – коэффициент сопротивления линии, дросселей; p_a – давление на выходе, Па; p_m – давление питания, Па; m – масса подвижных частей, кг; S – максимальный ход поршня, м; F_{tr} – сила трения, Н.

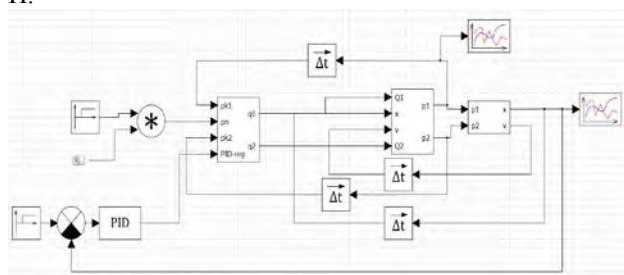


Рис. 1. Модель пневмопривода в Simintech для нахождения коэффициентов ПИД-регулятора

Эмпирическим путем было выявлено, что добавление дифференцирующего звена, система теряла устойчивость, а интегральная составляющая давала еще большие колебания в переходном процессе. Таким образом осталась только пропорциональная составляющая, с помощью которой было увеличено быстродействие и плавность перехода до конечного значения, однако по его достижению возникают небольшие колебания. Оптимальным значением Kp является значение 2.4, при котором достигаются наилучшие показатели.

Разработка системы управления на основе нечеткой логики включает несколько этапов. В начале экспертным путем задаются режимы работы – типовые операции работы пневмопривода на основе элементарных программ управления и формируются изменения параметров во времени. Регулирование режимов работы приводов в конечных и промежуточных положениях, построенных на нечеткой логике, можно осуществить путём управляемого дрос-

селирования потока.

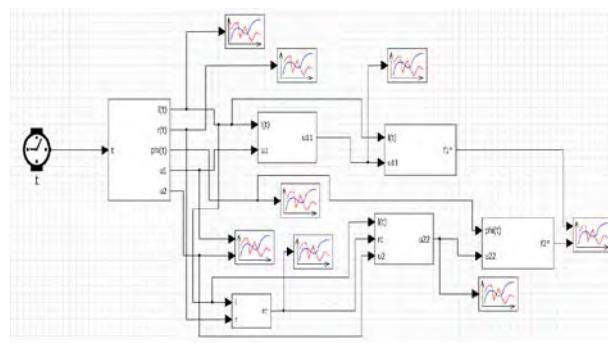


Рис. 2. Схема моделирования в Simintech изменения площади дроссельных сечений пневмоцилиндра прямого движения

Модель на рис. 2 отражает все необходимые параметры для вывода изменений площади дроссельных отверстий, а именно на модели представлены изменение ход поршня пневмопривода прямого движения, угла поворота подвижного элемента поворотного действия, а также при совместном их движении. В модели также присутствуют управляющие воздействия, приложенные к грузу, с помощью которых, на модели выводятся управляющие воздействия, необходимые для приложения уже к самим пневмоприводам, поворотного и прямого действия

$$u_{11} = \frac{(m_0 l(t) + M) u_1 + u_{1TP}}{S_1},$$

$$u_{22} = \frac{(m_0 l(t) + M) \frac{u_2 r_c(t)}{h} + u_{2TP}}{S_2},$$

где h – плечи усилий, r_c – координата центра масс в произвольный момент времени, равная

$$r_c(t) = \frac{\left(\frac{r(t)^2 m_0}{2} + M r(t) \right)}{(m_0 l(t) + M)},$$

$$u_1 = [6l_1 \left(1 - 2 \frac{t}{t_1} \right) \frac{1}{t_1^2}] \cos(\beta + \arcsin \frac{l(t) \sin \beta}{\sqrt{l^2(t) + r_0^2 - 2l(t)r_0 \cos \beta}})$$

$$u_2 = [6l_1 \left(1 - 2 \frac{t}{t_1} \right) \frac{1}{t_1^2}] \sin(\beta + \arcsin \frac{l(t) \sin \beta}{\sqrt{l^2(t) + r_0^2 - 2l(t)r_0 \cos \beta}}),$$

$$l(t) = l_1 \left(3 - 2 \frac{t}{t_1} \right) \frac{t^2}{t_1^2}.$$

Модель получения управляющих функций u_{11} и u_{22} реализованная в ПО Simintech представлена на рис. 3.

Следующий этап включает получение множества экспериментальных данных параметров (L , α_1 , α_2) работы привода в соответствии с технологическим процессом по перемещению деталей массой 0,1 кг. Затем проводится фазификация, то есть преобразование четких экспериментальных значений входных переменных в нечеткие с использова-

нием лингвистического описания параметров (L , α_1 , α_2).

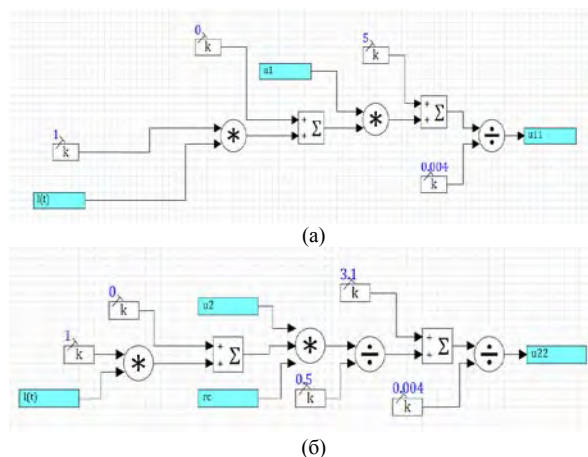


Рис. 3. Схема моделирования в Simintech для построения u_{11} (а), u_{22} (б)

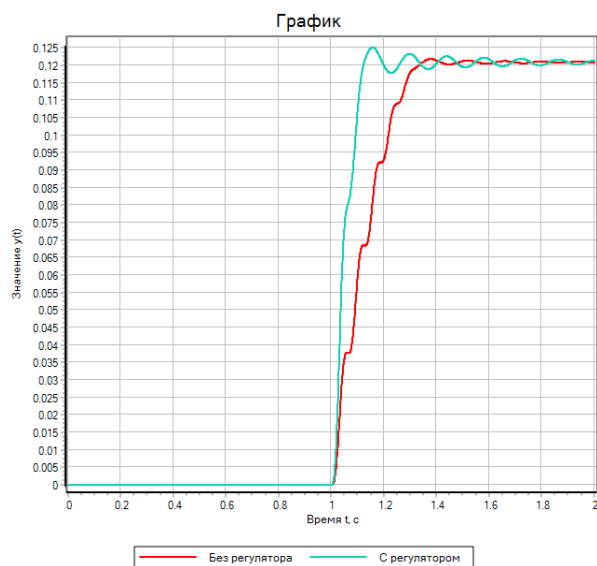


Рис. 4. Графики перемещения штока пневмопривода с регулятором и без регулятора

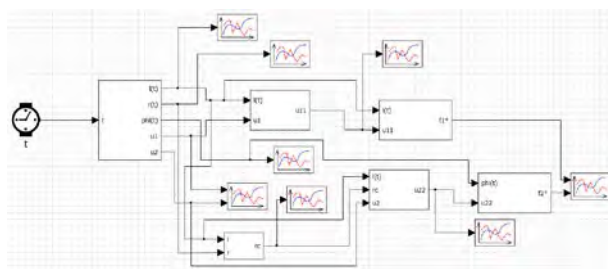


Рис. 5. Схема моделирования в Simintech изменения площади дроссельных сечений пневмоцилиндра прямого движения для поворотной камеры

Построение систем нечеткого вывода основано на понятии лингвистической переменной.

$$\langle X, U, FL(x), Stx(x), Sem(x) \rangle,$$

где X – название конкретного параметра (L , α_1 , α_2); U – базовое множество диапазона значений параметров L , α_1 , α_2 ; $FL(x)$ – нечеткие метки; $Stx(x)$ – синтаксические правила формирования команд управления; $Sem(x)$ – семантические множества, показывающие отношения лингвистических переменных друг на друга. Лингвистические переменные: L – линейная длина измерительного элемента, волновода, датчика измерителя пути. Регулирование режимов работы приводов в конечных и промежуточных положениях, построенных на нечёткой логике, возможно осуществить путём управляемого дросселирования потока, осуществляемого крановым пневмораспределителем, приводимого от шагового электродвигателя.

1. Холопов В.А., Голубцов И.Н. Математическая модель управления цикловым оборудованием // Промышленные АСУ и контроллеры. 2015. № 3. С. 14-18.
2. Холопов В.А., Мелкова С.О., Зайцев Е.В. Метод описания цикловых устройств для обеспечения проектирования системы управления // Вестник Московского государственного университета приборостроения и информатики. Серия: Приборостроение и информационные технологии. 2012. № 38. С. 85-91.
3. Кушнир А.П. Виртуальный контроль сборки изделия на стадии проектирования // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2009. № 5. С. 54-56.
4. Холопов В.А., Руднева Л.Ю. Особенности автоматизированной технологии сборки специальных изделий // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2014. Т. 14. № 4. С. 183-186.
5. Чижиков В.И. Исследование динамики манипуляторов с регулярными звеньями // Промышленные АСУ и контроллеры. 2011. № 3. С. 19-28.
6. Ozawa R., Arimoto S., Nakamura S., and Bae J. H. Control of an object with parallel surfaces by a pair of finger robots without object sensing // IEEE Transactions on Robotics. 2005. V. 21. N. 5. P. 965-976.
7. Чижиков В.И. Проектирование упругого кинематического соединения бесшарнирного манипулятора для технологических операций в экранированной среде // Автоматизация и современные технологии. 2013. № 5. С. 32-40.
8. Чижиков В.И. Управление упругим кинематическим соединением бесшарнирного манипулятора // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2013. № 7. С. 3-8.
9. Албагачиев А.Ю., Кушнир А.П. Прогнозирование результатов измерения инерционных параметров на основе математического моделирования // Приборы. 2012. № 9 (147). С. 24-28.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТРУИ ТРАНСПОРТИРУЮЩЕГО ГАЗА НА ФОРМИРОВАНИЕ СЛОЯ МЕТАЛЛА В УСЛОВИЯХ 3D ПЕЧАТИ С ИМПУЛЬСНЫМ ЛАЗЕРНЫМ НАГРЕВОМ

Н.Н. Чунихин

Российский технологический университет «МИРЭА», Москва, Россия

Работа посвящена вопросам 3D-печати металлом с импульсным лазерным нагревом. Рассматриваются вопросы формирования многослойного металла под действием давления струи транспортирующего газа.

Ключевые слова: 3D-печать металлом с импульсным лазерным нагревом, формирование слоя наплавленного металла.

В настоящее время большинство аддитивных технологий разделяют по методам формирования слоя. Это принципиально отличает два вида аддитивных технологий: Bed Deposition и Direct Deposition [1].

Аддитивная технология 3D печати металлом с импульсным лазерным нагревом при которой транспортирование порошковых присадочных материалов в зону построения осуществляется струей транспортирующего газа – аргона или гелия относится ко второму виду аддитивных технологий – «Direct Deposition».

По этой технологии производится «прямое введение материала» непосредственно в точку, куда подводится энергия импульсного лазера и где происходит в данный момент построение фрагмента детали [1, 2].

Известно, что, струя транспортирующего газа, направленная на поверхность расплавленного металла оказывает на нее силовое воздействие, которое может вызывать деформацию поверхности расплава [2].

Результаты анализа гидродинамических процессов, протекающих в ванне расплавленного металла, образовавшейся при импульсном нагреве металла лазерным излучением в условиях 3D печати, показывают, что под действием динамического давления транспортирующего газа поверхность расплавленного металла деформируется. Величина деформации поверхности расплава - h_d может быть найдена из соотношения

$$h_d = 4\sigma / U_0^2 \rho_0 \cos \alpha_0 - \sqrt{\left(\frac{4\sigma}{U_0^2 \rho_0 \cos \alpha_0}\right)^2 - \frac{d_s^2}{4}}, \quad (1)$$

где U_0 , ρ_0 - соответственно, скорость и плотность транспортирующего газа; d_s - диаметр ванны расплава; σ - поверхностное натяжение расплава; α_0 - угол наклона струи транспортирующего газа.

На рисунке 1 представлены зоны воздействия импульса лазерного излучения на сталь 12X18H10T при различных скоростях истечения транспортирующего газа - аргона.

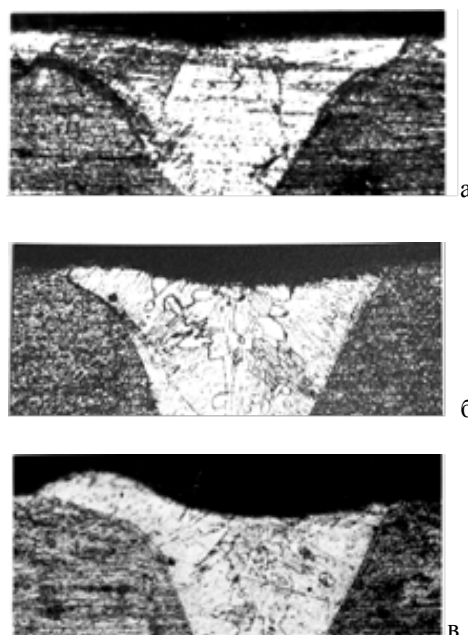


Рис. 1. Внешний вид поперечного сечения зоны воздействия импульса лазерного излучения на сталь 12X18H10T при различных скоростях транспортирующего газа (аргона);

а – скорость транспортирующего газа $U_{тг} = 0$ м/с;
б – скорость транспортирующего газа $U_{тг} = 35$ м/с;
в – скорость транспортирующего газа $U_{тг} = 90$ м/с.

Результаты исследований, представленные на рисунке 1 показывают, что при скоростях истечения струи транспортирующего газа менее 35 м/с деформации поверхности расплава не превышает 0,05 мм. Дальнейшее увеличение скорости транспортирующего газа вызывает увеличение деформации поверхности ванны.

На рисунке 2 представлены зависимости величины деформации поверхности расплава h_d от скорости транспортирующего газа $U_{тг}$, полученные расчетом по уравнению (1) и экспериментально.

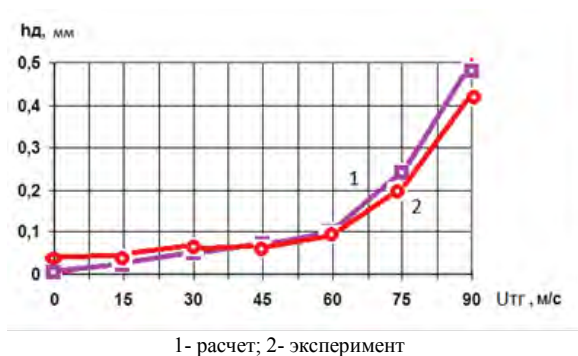


Рис. 2. Зависимость деформации поверхности расплава h_d от скорости транспортирующего газа $U_{тг}$.

Таким образом, экспериментально установлено, что при 3D-печати с импульсным лазерным нагревом

динамическое воздействие струи газа на поверхность с ванны расплава вызывает деформацию поверхности, которая может оказывать существенное влияние на формирование слоев металла из которых формируется фрагмент детали.

1. Довбыш В.М., Забеднов П.М., Зеленко М.А. Аддитивные технологии и изделия из металла. [Электронный ресурс]. URL: http://nami.ru/uploads/docs/centrtechnology_docs/55a62fc89524bAT_metall.pdf. (Дата обращения 19.09.2020).
2. Албагачиев А.Ю., Чунихин Н.Н., Минаева Н.И. Исследование транспортирования порошковых присадочных материалов в зону лазерного нагрева при 3D-печати // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2021, No. 1, С. 51–56.

КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТОМОГРАФЫ

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

diondo
x-ray systems and services



d₁ КОМПАКТНАЯ СИСТЕМА БОЛЬШИЕ ВОЗМОЖНОСТИ

- + Максимальные размеры исследуемого объекта 300 мм диам., 500 мм высота.
- + Микрофокусная трубка 160 - 225 кВ (Трансмиссионная/ Рефлекционная)
- + Большой плоский детектор высокого разрешения до 4К - 16,7 Mpixel
- + Гранитное основание системы перемещения с точностью до 1 мкм
- + 3D метрология и измерения согласно стандарту VDI/VDE 2630
- + ПО Helix-CT
- + Размеры системы в защитной камере 1900 x 1250 x 1850 мм



d₂ САМАЯ СОВРЕМЕННАЯ МИКРОФОКУСНАЯ СИСТЕМА

- + Максимальные размеры исследуемого объекта 500 мм диам., 700 мм высота.
- + Микрофокусная трубка до 300 кВольт
- + Большой плоский детектор высокого разрешения 3К - 9,4 Mpixel
- + Гранитное основание системы перемещения
- + 3D метрология и измерения согласно стандарту VDI/VDE 2630
- + ПО Helix-CT
- + Размеры системы в защитной камере 3200 x 2050 x 2200 мм



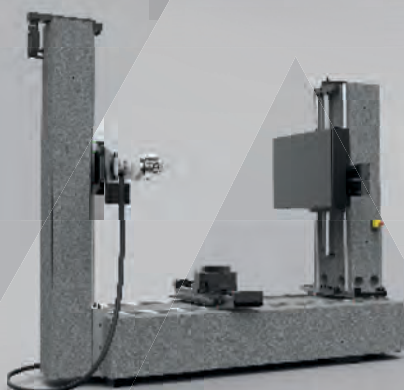
d₃ МИКРОФОКУСНЫЙ ТОМОГРАФ ПО ЖЕЛАНИЮ ЗАКАЗЧИКА

- + Максимальные размеры исследуемого объекта 700 мм диам., 1300 мм высота.
- + Микрофокусная трубка до 300 кВольт (Трансмиссионная/Рефлекционная)
- + Большой плоский детектор высокого разрешения 3К - 9,4 Mpixel
- + Гранитное основание системы перемещения
- + Размеры системы перемещения по желанию заказчика (размеры/количество осей)
- + 3D метрология и измерения согласно стандарту VDI/VDE 2630
- + ПО Helix-CT
- + Размеры системы в защитной камере 4000 x 2500 x 2900 мм



d₄ КОМПАКТНЫЙ ТОМОГРАФ ВЫСОКОЙ МОЩНОСТИ

- + Максимальные размеры исследуемого объекта 500 мм диам., 1000 мм высота.
- + Источники высокой мощности (450кВт / 600 кВт)
- + Большой плоский детектор высокого разрешения до 16,7 Mpixel
- + Линейный детектор высокого разрешения
- + Гранитное основание системы перемещения с точностью до 1 мкм
- + ПО Helix-CT & Multiline-CT
- + Размеры системы в защитной камере 3200 x 2050 x 2200 мм



d₅ МНОГОЦЕЛЕВОЙ ТОМОГРАФ С ДВУМЯ ИСТОЧНИКАМИ И ДЕТЕКТОРАМИ

- + Максимальные размеры исследуемого объекта 800 мм диам., 1500 мм высота.
- + Микрофокусные трубки до 300 кВТ (Трансмиссионные/ Рефлекционные)
- + Источники высокой мощности (450 кВт / 600 кВт)
- + Широкий выбор плоских и линейных детекторов
- + Система перемещения по желанию заказчика (размеры / количество осей)
- + ПО Helix-CT & Multiline-CT
- + Размеры системы в защитной камере 3500 x 2500 x 3200 мм

Официальный представитель
в России: **ООО «Сайнтифик»**
192029, Санкт-Петербург, ул.
Бабушкина д. 3, оф. 418

Тел.
E-Mail:
WEB

8-800-556-78-90
info@snif.ru
www.snif.ru

СОДЕРЖАНИЕ

№ п.п.	Авторы, названия статей и организаций	Стр.
1	Аборкин А.В., Бабин Д.М., Залеснов А.И., Бокарёв Д.В. ВЛИЯНИЕ МУНТ-ГИБРИДНЫХ СТРУКТУР НА ЖАРОПРОЧНОСТЬ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА <i>ВлГУ, Владимир, Россия</i>	3
2	Аборкин А.В., Хорьков К.С., Бокарёв Д.В. СРАВНЕНИЕ СУХИХ И РАСТВОРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПОЛУЧЕНИЯ ПОРОШКОВЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА, АРМИРОВАННЫХ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОСТРУКТУРАМИ <i>ВлГУ, Владимир, Россия</i>	5
3	Албагачиев А.Ю., Иванов С.В., Мельников Д.А., Антошин В.А. ИССЛЕДОВАНИЕ АБРАЗИВНОГО ИЗНОСА ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ СТЕКЛОКОМПОЗИТНЫХ ТРУБ <i>ИМАШ РАН, Москва, Россия; ООО «Новые Трубные Технологии», Москва, Россия</i>	7
4	Албагачиев А.Ю., Кушнир А.П. ТЕХНОЛОГИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ ГИДРОСТРУЙНОЙ ОБРАБОТКИ <i>ИМАШ РАН, Москва, Россия</i>	10
5	Албагачиев А.Ю., Пашков М.В., Хисамутдинов Р.М., Хрущов М.М. ПОВЫШЕНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕТАЛЕЙ АВТОМОБИЛЕЙ НАНЕСЕНИЕМ УПРОЧНЯЮЩИХ АЛМАЗОПОДОБНЫХ УГЛЕРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ <i>ИМАШ РАН, Москва, Россия; ПАО «КАМАЗ», Набережные Челны, Республика Татарстан, Россия</i>	12
6	Албагачиев А.Ю., Прохорович В.Е. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ (СТП) <i>ИМАШ РАН, Москва, Россия; Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия</i>	15
7	Алешин А.К., Ковалева Н.Л., Фирсов Г.И. АНАЛИЗ ОБЛАСТЕЙ РАБОТОСПОСОБНОСТИ МЕХАНИЗМОВ ЦИКЛИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ НА ПРИМЕРЕ ПОВОРОТНЫХ СТОЛОВ <i>ИМАШ РАН, Москва, Россия</i>	19
8	Алешин А.К., Ковалева Н.Л., Фирсов Г.И. ОЦЕНИВАНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ ЦЕННОСТИ КРИТЕРИЕВ РАБОТОСПОСОБНОСТИ МЕХАНИЗМОВ ЦИКЛИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ В НАТУРНОМ И МАТЕМАТИЧЕСКОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ <i>ИМАШ РАН, Москва, Россия</i>	22

- | | | |
|----|---|----|
| 9 | <p>Алисин В.В., Лукьянов А.И., Рощин М.Н.
 ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПАРЫ ТРЕНИЯ ДЛЯ РАБОТЫ
 ПЛУНЖЕРНОГО ДОЖИМНОГО КОМПРЕССОРА В АТМОСФЕРЕ
 ВЕНЕРЫ
 ИМАШ РАН, Москва, Россия</p> | 25 |
| 10 | <p>Алисин В.В., Рощин М.Н., Лукьянов А.И.
 УЛУЧШЕНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
 УГЛЕРОДОСодЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ МОДИФИКАЦИЕЙ
 ПОВЕРХНОСТИ ТРЕНИЯ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ
 ИМАШ РАН, Москва, Россия</p> | 27 |
| 11 | <p>Антонова О.С., Гольдберг М.А., Проценко П.В., Коновалов А.А.,
 Хайрутдинова Д.Р., Оболкина Т.О., Баринев С.М.
 ОКРАШЕННЫЕ НАНОДИСПЕРСНЫЕ ПОРОШКИ ТРИКАЛЬЦИЙ-
 ФОСФАТА, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫЕ ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ
 МЕТОДОМ DLP
 ИМЕТ РАН, Москва, Россия</p> | 29 |
| 12 | <p>Антошин В.А., Мельников Д.А., Иванов С.В., Албагачиев А.Ю.
 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОЛГОВРЕМЕННЫХ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ
 СТЕКЛОКОМПОЗИТНЫХ ТРУБ ДЛЯ РАСЧЕТА СРОКА
 ЭКСПЛУАТАЦИИ
 ИМАШ РАН, Москва, Россия; ООО «Новые Трубные Технологии», Москва,
 Россия</p> | 31 |
| 13 | <p>Атрощенко В.В., Селиванов А.С., Лобачев В.С., Логачев Ю.В.
 СВАРКА ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ КОНСТРУКЦИЙ
 ИЗ МЕДИ
 ООО «Аттестационный центр СваркаТехСервис», Уфа, Россия</p> | 34 |
| 14 | <p>Барденхаген А., Печейкина М.А., Раков Д.Л., Тодоров В.Т.
 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПОИСКА
 ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
 TU Berlin, Берлин, Германия; МЭИ (НИУ), Москва, Россия; ИМАШ РАН,
 Москва, Россия</p> | 37 |
| 15 | <p>Белов В.Г., Королев К.В., Попова Л.В.
 ИССЛЕДОВАНИЕ СОВМЕЩЕННЫХ ПРОЦЕССОВ
 ПРЕССОВАНИЯ ТРУБ «ПРЕССОВАНИЕ С РЕДУЦИРОВАНИЕМ»
 И «ПРЕССОВАНИЕ С РАЗДАЧЕЙ»
 РТУ «МИРЭА», Москва, Россия</p> | 40 |
| 16 | <p>Белоусов И.В., Минаева Н.И., Кузнецова К.Д.
 ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
 ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
 ПРИ ПЛАВЛЕНИИ АЛЮМИНИЯ
 РТУ «МИРЭА», Москва, Россия</p> | 43 |
| 17 | <p>Бельченко Ф.М., Ермолов И.Л.
 ПРИМЕНЕНИЕ ЦЕЛЕВЫХ ИСКАЖЕНИЙ В ИЗОБРАЖЕНИЯХ
 СИСТЕМ ТЕЛЕМЕТРИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ
 ИПМех РАН, Москва, Россия</p> | 45 |

18	Броновец М.А. ПРОБЛЕМЫ, ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ В ОТКРЫТОМ КОСМОСЕ <i>ИПМмех РАН, Москва, Россия</i>	47
19	Буковский П.О. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ И ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗНАШИВАНИЯ ФРИКЦИОННЫХ УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИТОВ <i>ИПМех РАН, Москва, Россия</i>	50
20	Бырдин В.М. ОБ ОБРАТНОВОЛНОВОЙ МЕХАНИКЕ, ЭЛЕКТРОДИНАМИКЕ И ТЕХНОЛОГИИ <i>ИМАШ РАН, Москва, Россия</i>	52
21	Бырдин В.М., Пузакина А.К. ДВОЙНЫЕ И КРАТНЫЕ, КОСЫЕ И ОРТО-РАЗВОРОТЫ ВОЛНОВОГО ПОЛЯ И НАПРАВЛЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ОБРАТНОВОЛНОВЫХ СИСТЕМАХ <i>ИМАШ РАН, Москва, Россия</i>	56
22	<u>Воробьев Е.И.</u> , Конева Е.Е., Моргуненко К.О. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ МЕХАНИЗМОВ СХВАТОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ С УЧЕТОМ СИЛ ТРЕНИЯ И СИЛ ИНЕРЦИИ <i>ИМАШ РАН, Москва, Россия; РТУ «МИРЭА», Москва, Россия</i>	59
23	<u>Воробьев Е.И.</u> , Михеев А.В., Дорофеев В.О., Конева Е.Е. СИСТЕМА ТАКТИЛЬНОГО И СИЛОВОГО ОЧУВСТВЛЕНИЯ ПРОТЕЗА КИСТИ РУКИ <i>ИМАШ РАН, Москва, Россия</i>	63
24	Воронин Н.А. МЕХАНИЗМЫ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ ТОПОКОМПОЗИТА СИСТЕМЫ АIN-Д16Т ПРИ МИКРОИНДЕНТИРОВАНИИ <i>ИМАШ РАН, Москва, Россия</i>	65
25	Воронцов А.Л., Карпов С.М. ИННОВАЦИОННОЕ ИЗГОТОВЛЕНИЕ ВЫДАВЛИВАНИЕМ П- ОБРАЗНЫХ КРОНШТЕЙНОВ С ПРОИЗВОЛЬНЫМ СООТНОШЕНИЕМ ТОЛЩИН СТЕНОК <i>МГТУ, Москва, Россия</i>	68
26	Воронцов А.Л., Лебедева Д.А. ФУНДАМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЩЕГО СЛУЧАЯ КОМБИНИРОВАННОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ СТАКАНОВ С КОНИЧЕСКИМ ДНОМ <i>МГТУ, Москва, Россия</i>	70

- | | | |
|----|---|----|
| 27 | <p>Воронцов А.Л., Решиков Е.О.</p> <p>ПРОГРЕССИВНЫЙ СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ ВНУТРЕННЕГО ВЫСТУПА РАДИАЛЬНЫМ ВЫДАВЛИВАНИЕМ ТРУБНОЙ ЗАГОТОВКИ</p> <p><i>МГТУ, Москва, Россия</i></p> | 72 |
| 28 | <p>Гаврилина Л.В., Печейкина М.А., Раков Д.Л., Сухоруков Р.Ю.</p> <p>АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОРФОЛОГИЧЕСКОГО ПОДХОДА</p> <p><i>ИМАШ РАН, Москва, Россия; МЭИ (НИУ), Москва, Россия</i></p> | 74 |
| 29 | <p>Гаврилина Л.В., Сухоруков Р.Ю., Утяшев Ф.З.</p> <p>К ВОПРОСУ О МЕХАНИКЕ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ СТРУКТУРЫ В ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВАХ</p> <p><i>ИМАШ РАН, Москва, Россия; ИПСМ РАН, Уфа, Россия</i></p> | 77 |
| 30 | <p>Гадолина И.В., Петрова И.М.</p> <p>ЭВОЛЮЦИЯ СВОЙСТВ СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ИЛИ ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ НЕРЕГУЛЯРНОМ НАГРУЖЕНИИ</p> <p><i>ИМАШ РАН, Москва, Россия</i></p> | 79 |
| 31 | <p>Ганиев С.Р., Касилов В.П., Кислогубова О.Н., Бутикова О.А., Кочкина Н.Е.</p> <p>ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВОЛНОВЫХ РЕЗОНАНСНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ПРОЦЕСС ПОЛУЧЕНИЯ НАНОЧАСТИЦ КРАХМАЛА</p> <p><i>ИМАШ РАН, Москва, Россия; ИХР РАН, Иваново, Россия</i></p> | 82 |
| 32 | <p>Горин А.В., Родичева И.В., Токмаков Н.В.</p> <p>ФОРМИРОВАНИЕ ТВЕРДЫХ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ</p> <p><i>ОГУ, Орел, Россия</i></p> | 84 |
| 33 | <p>Грядунов С.С., Сиваков В.В.</p> <p>КОМПЛЕКС ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ НА АБРАЗИВНОЕ ИЗНАШИВАНИЕ</p> <p><i>БГТУ, Брянск, Россия; БГИТУ, Брянск, Россия</i></p> | 86 |
| 34 | <p>Даровской Г.В., Поляков В.Н.</p> <p>СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ МЕХАНИЗМА НАГРУЖЕНИЯ РОЛИКОВЫХ МАШИН ТРЕНИЯ</p> <p><i>РГУПС, Ростов-на-Дону, Россия</i></p> | 89 |
| 35 | <p>Дашевский И.Н., Балыева А.В.</p> <p>КВАНТОВОХИМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ АДГЕЗИИ ПОКРЫТИЯ ИЗ ТРИКАЛЬЦИЙФОСФАТА К ТИТАНУ</p> <p><i>ИПМех РАН, Москва, Россия; Univ. of North Georgia, Gainesville (GA), США</i></p> | 91 |

- | | | |
|----|---|-----|
| 36 | <p>Долгов Г.А., Сидоренко В.С., Коротыч Д.А., Приходько С.П.
 АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ГРУППОВОЙ ПНЕВМОПРИВОД
 ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ РЕВОЛЬВЕРНОЙ
 ГОЛОВКИ СТАНКА
 ДГТУ, Ростов-на-Дону, Россия</p> | 93 |
| 37 | <p>Ерофеев М.Н., Кравченко И.Н., Бодунов Д.М.
 АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЦИФРОВЫХ МЕТОДОВ
 УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ИЗДЕЛИЙ
 МАШИНОСТРОЕНИЯ
 ИМАШ РАН, Москва, Россия</p> | 96 |
| 38 | <p>Жачкин С.Ю., Трифонов Г.И., Кукарских Л.А.
 ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ПОДБОР ДИСПЕРСНО-НАПОЛНЕННОГО
 КОМПОЗИТА С ЦЕЛЬЮ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАБОЧИХ
 ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛИ ПУТЕМ ПЛАЗМЕННОГО
 НАПЫЛЕНИЯ
 ВВА им. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, Воронеж, Россия; ВГТУ,
 Воронеж, Россия</p> | 98 |
| 39 | <p>Завойчинская Э.Б.
 О ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВАХ ОЦЕНКИ БЕЗОПАСНОСТИ
 ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРОТЯЖЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ В
 РАЗЛИЧНЫХ ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ
 УСЛОВИЯХ
 МГУ, Москва, Россия</p> | 101 |
| 40 | <p>Зацаринный В.В.
 ВЛИЯНИЕ РАССЕЯНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК МЕХАНИЧЕСКИХ
 СВОЙСТВ НА ОЦЕНКУ ПРОЧНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ
 ИМАШ РАН, Москва, Россия</p> | 104 |
| 41 | <p>Зернин М.В., Бабин А.П., Просолович А.А.
 КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ АЛГОРИТМ И ПРОГРАММА
 РЕШЕНИЯ КОНТАКТНЫХ ЗАДАЧ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ
 «КОНТАКТНОЙ СРЕДЫ»
 БГТУ, Брянск, Россия</p> | 107 |
| 42 | <p>Зинин А.В., Азиков Н.С.
 УСТАЛОСТЬ И РАЗРУШЕНИЕ ГИБРИДНЫХ
 КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ МАЛОЦИКЛОВОМ
 НАГРУЖЕНИИ
 МАИ (НИУ), Москва, Россия; ИМАШ РАН, Москва, Россия</p> | 110 |
| 43 | <p>Зорин В.А., Ле Чонг Туан, Ерофеев М.Н., Буяновский И.А.,
 Самусенко В.Д., Щербаков Ю.И.
 ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
 ПЛАСТИЧНОГО СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА НА
 ОСНОВЕ СОЛИДОЛА И ПОЛИМОЧЕВИНЫ
 МАДИ, Москва, Россия; ИМАШ РАН, Москва, Россия</p> | 113 |

- | | | |
|----|--|-----|
| 44 | <p>Зуев В.В., Преображенская Е.В., Кислова А.В., Крештин М.С.
 КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ДЕТАЛЕЙ В МАШИНОСТРОЕНИИ С
 ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ GEOMAGIC
 CONTROL X
 <i>РТУ «МИРЭА», Москва, Россия</i></p> | 116 |
| 45 | <p>Иванов Г.Ю., Фролов А.Д., Кулаков О.И.
 ИНЕРЦИОННАЯ СВАРКА ТРЕНИЕМ РАЗНОРОДНЫХ СТАЛЕЙ И
 МЕТАЛЛОВ МАЛОГО ДИАМЕТРА
 <i>ИМАШ РАН, Москва, Россия</i></p> | 118 |
| 46 | <p>Казаков Ю.Н., Корнаев А.В., Шутин Д.В., Савин Л.А.
 АКТИВНЫЙ КОНИЧЕСКИЙ ПОДШИПНИК ЖИДКОСТНОГО
 ТРЕНИЯ С РЕГУЛИРУЕМЫМ СРЕДНИМ ЗАЗОРОМ
 <i>ОГУ, Орел, Россия</i></p> | 120 |
| 47 | <p>Калита В.И., Комлев Д.И., Радюк А.А., Шамрай В.Ф.,
 Михайлова А.Б, Алпатов А.В., Титов Д.Д.
 ПОВЫШЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЛАЗМЕННЫХ
 ПОКРЫТИЙ
 <i>ИМЕТ РАН, Москва, Россия</i></p> | 123 |
| 48 | <p>Капустин В.В., Памфилов Е.А.
 ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНАШИВАНИЯ ПОДШИПНИКОВ
 СКОЛЬЖЕНИЯ ШАРНИРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ
 <i>БГТУ, Брянск, Россия</i></p> | 126 |
| 49 | <p>Керопян А.М.
 ОБОСНОВАНИЕ АКТУАЛЬНОСТИ МОНИТОРИНГА ГЕОМЕТРИ-
 ЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТЕЙ КАТАНИЯ
 КАРЬЕРНЫХ РЕЛЬСОВЫХ ПУТЕЙ
 <i>ООО «МНИПИИТИ», Москва, Россия</i></p> | 129 |
| 50 | <p>Кокорин В.Н.
 МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ МОНОМОЛЕКУЛЯРНОГО СЛОЯ
 ВОДОРОДА НА АКТИВНЫХ ЦЕНТРАХ АДсорбции
 <i>УлГТУ, Ульяновск, Россия</i></p> | 133 |
| 51 | <p>Королев К.В., Ермаков Ю.М., Белов В.Г.
 К ВОПРОСУ О ТЕЧЕНИИ МЕТАЛЛА ПРИ ПРЕССОВАНИИ
 ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ПРОФИЛЕЙ С ОТВЕРСТИЕМ
 ИЗ КРУГЛОГО КОНТЕЙНЕРА
 <i>РТУ «МИРЭА», Москва, Россия</i></p> | 135 |
| 52 | <p>Краско А.С.
 НАПРАВЛЕННОЕ ФОРМИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА
 ПРИ РАЗРАБОТКЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
 ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ С
 ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИМИ
 ПОКРЫТИЯМИ
 <i>МГТУ, Москва, Россия; РТУ «МИРЭА», Москва, Россия</i></p> | 138 |

- | | | |
|----|--|-----|
| 53 | <p>Кудрявцев И.В., Преображенская Е.В., Боровик Т.Н.,
Евдокимов К.А.
ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ FDM-ПЕЧАТИ
НА СОЕДИНЕНИЕ ИЗДЕЛИЯ С РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ 3D-
ПРИНТЕРА
<i>РТУ «МИРЭА», Москва, Россия</i></p> | 141 |
| 54 | <p>Кулаков О.И.
ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ПАР ТРЕНИЯ
ОПОРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИНЖЕНЕРНЫХ СЕТЕЙ
<i>ИМАШ РАН, Москва, Россия</i></p> | 142 |
| 55 | <p>Кулаков О.И.
ЦИФРОВОЙ ТЕРМОПАРНЫЙ ВАКУУММЕТР
<i>ИМАШ РАН, Москва, Россия</i></p> | 144 |
| 56 | <p>Кулешова Е.М., Поляков С.А., Куксенова Л.И., Медовщиков А.В.
РАСЧЕТ ЧЕРВЯЧНЫХ ПЕРЕДАЧ С УЧЁТОМ ИЗМЕНЕНИЯ ИХ
ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
<i>МГТУ, Москва, Россия; ИМАШ РАН, Москва, Россия</i></p> | 146 |
| 57 | <p>Лукьянов А.И.
ВЛИЯНИЕ МОДИФИКАЦИИ УГЛЕРОДОСОДЕРЖАЩЕГО
МАТЕРИАЛА НА КОЭФФИЦИЕНТ ТРЕНИЯ
ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ
<i>ИМАШ РАН, Москва, Россия</i></p> | 148 |
| 58 | <p>Лутьянов А.В., Сухоруков К.А., Баранова Н.С.
МОДЕЛИРОВАНИЕ УГЛОВОЙ ЖЕСТКОСТИ ПОДШИПНИКОВ
ПРИ ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ В ЗАЗОРЕ
<i>РТУ «МИРЭА», Москва, Россия</i></p> | 150 |
| 59 | <p>Малафеев С.И., Копейкин А.И., Павлов Д.А.
МЕХАТРОННАЯ КОЛЕБАТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ
ИДЕНТИФИКАЦИИ ХАРАКТЕРИСТИК ТРЕНИЯ
<i>ВлГУ, Владимир, Россия</i></p> | 152 |
| 60 | <p>Малафеева А.А., Малафеев С.С.
КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ И РЕСУРСА КОМПОНЕНТОВ
МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ С ПОМОЩЬЮ ЦИФРОВЫХ
ДВОЙНИКОВ
<i>ВлГУ, Владимир, Россия; Владимирский политехн. колледж, Владимир,
Россия</i></p> | 155 |
| 61 | <p>Маленко П.И., Леонов А.Ю.
ВЛИЯНИЕ ДИФфуЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ
ФРИКЦИОННОМ НАГРЕВЕ ТЕПЛОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ С
ПОКРЫТИЕМ НА СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ
В ПОВЕРХНОСТНОЙ ЗОНЕ
<i>ТулГУ, Тула, Россия</i></p> | 158 |

- | | | |
|----|--|-----|
| 62 | <p>Маслов С.В.</p> <p>ДИАГНОСТИКА ТЕРМОНАПРЯЖЁННОГО СОСТОЯНИЯ
ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОБОРУДОВАНИЯ АЭС И ТЭС
С ПРИМЕНЕНИЕМ НАТУРНОЙ ТЕНЗОТЕРМОМЕТРИИ</p> <p><i>ИМАШ РАН, Москва, Россия</i></p> | 161 |
| 63 | <p>Махутов Н.А., Макаренко И.В., Макаренко Л.В.</p> <p>ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ
ХОЛОДОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ ПРИ КРИОГЕННЫХ
ТЕМПЕРАТУРАХ</p> <p><i>ИМАШ РАН, Москва, Россия</i></p> | 164 |
| 64 | <p>Махутов Н.А., Макаренко И.В., Макаренко Л.В.</p> <p>УСЛОВИЯ МИКРО РАЗРУШЕНИЯ НА ОСНОВЕ
ДВУХПАРАМЕТРИЧЕСКОГО КРИТЕРИЯ ПРИ СЛОЖНОМ
НАГРУЖЕНИИ</p> <p><i>ИМАШ РАН, Москва, Россия</i></p> | 165 |
| 65 | <p>Мельников Д.А., Албагачиев А.Ю., Антошин В.А., Иванов С.В.</p> <p>ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЗАПАСА ПРОЧНОСТИ
КОНСТРУКЦИИ СТЕКЛОКОМПОЗИТНЫХ ТРУБ ДЛЯ
МИКРОТОННЕЛИРОВАНИЯ</p> <p><i>ИМАШ РАН, Москва, Россия; ООО «Новые Трубные Технологии», Москва,
Россия</i></p> | 166 |
| 66 | <p>Мироненко Я.В.</p> <p>ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ, ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ДЛЯ
ОБРАБОТКИ АЛГОРИТМАМИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ</p> <p><i>АО «РЭС Групп», Владимир, Россия</i></p> | 169 |
| 67 | <p>Михеев А.В., Тохметова А.Б., Тананов М.А.</p> <p>МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ СМЕШАННОЙ СМАЗКЕ</p> <p><i>ИМАШ РАН, Москва, Россия</i></p> | 171 |
| 68 | <p>Могильников Ю.В., Виноградов М.</p> <p>КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ И
ПОКРЫТИЙ: НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ</p> <p><i>ООО «Сайнтифик» Санкт-Петербург, Россия; RTEC-Instruments Inc., San
José (CA), США</i></p> | 175 |
| 69 | <p>Морозов А.В.</p> <p>ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА
КОЭФФИЦИЕНТ ТРЕНИЯ МЕЖДУ УГЛЕРОДНЫМИ
ВОЛОКНАМИ</p> <p><i>ИПМех РАН, Москва, Россия</i></p> | 177 |
| 70 | <p>Мышечкин А.А., Князев Я.О., Скрипник С.В., Уральский А.Е.</p> <p>ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИРОВАНИЕМ В ПРОГРАММЕ QFORM
СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ И УСЛОВИЙ ТРЕНИЯ В ПРОЦЕССАХ
ГОРЯЧЕЙ ШТАМПОВКИ</p> <p><i>РТУ «МИРЭА», Москва, Россия</i></p> | 178 |

71	Паличева А.С., Карцев С.В. АНАЛИЗ ИЗНАШИВАНИЯ ПЕРЕМЕШИВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ШНЕКОВОГО РАСТВОРИТЕЛЯ В ГАЛУРГИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ <i>ИМАШ РАН, Москва, Россия</i>	181
72	Пась О.В., Серков Н.А. ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ ПО ОСТАТОЧНОМУ ПОЛОТНУ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ВАФЕЛЬНЫХ ОБОЛОЧЕК ЗЕРКАЛЬНЫМ ФРЕЗЕРОВАНИЕМ <i>ФГУП «НПО «Техномаш» им. С.А. Афанасьева, Москва, Россия; ИМАШ РАН, Москва, Россия</i>	184
73	Пахомов М.А., Михеев А.В., Тананов М.А., Албагачиев А.Ю., Столяров В.В. МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИСПЫТАНИЙ УМЗ ТИТАНА В УСЛОВИЯХ ФРЕТТИНГ-ИЗНОСА <i>ИМАШ РАН, Москва, Россия</i>	187
74	Песковацков М.Н., Сплавский И.С., Воронин Н.А. МОДЕЛЬНЫЙ ТРИБОАНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ВЫСОКООБОРОТНЫХ УПОРНЫХ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ <i>ООО «Эталон-Центр», Радужный, Россия; ИМАШ РАН, Москва, Россия</i>	189
75	Петрова И.М., Филимонов М.А. ВЛИЯНИЕ ФРЕТТИНГ-КОРРОЗИИ НА НАДЕЖНОСТЬ ШАТУННЫХ БОЛТОВ <i>ИМАШ РАН, Москва, Россия; ООО «МЦОК «Технопрогресс», Москва, Россия</i>	192
76	Пилюшина Г.А., Памфилов Е.А. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НОЖЕЙ СИЛОВОГО РЕЗАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ <i>БГТУ, Брянск, Россия</i>	194
77	Плотников А.С. МЕТОД СВЕРЛЕНИЯ ОТВЕРСТИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ: АКТУАЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ <i>НИЯУ «МИФИ», Москва, Россия</i>	197
78	Попов С.Г., Казаков Ю.Н., Корнаев А.В., Савин Л.А. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕЖИМА ТРЕНИЯ В ПОДШИПНИКЕ СКОЛЬЖЕНИЯ <i>ОГУ, Орел, Россия</i>	200
79	Сахвадзе Г.Ж. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ КРИОГЕННОЙ ЛАЗЕРНО- УДАРНО-ВОЛНОВОЙ ОБРАБОТКИ В ИЗДЕЛИЯХ МАШИНОСТРОЕНИЯ <i>ИМАШ РАН, Москва, Россия</i>	202

- | | | |
|----|---|-----|
| 80 | <p>Сахвадзе Г.Ж., Сахвадзе Г.Г.
 АНАЛИЗ МИКРОТВЕРДОСТИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА Д16 ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ТЕХНОЛОГИИ КРИОГЕННОЙ ЛАЗЕРНО-УДАРНО-ВОЛНОВОЙ ОБРАБОТКИ
 ИМАШ РАН, Москва, Россия</p> | 205 |
| 81 | <p>Сгонов Н.М.
 3D-ПЕЧАТЬ КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ПО ТЕХНОЛОГИИ LSM
 ООО «ЭНЕРГОАВАНГАРД», Москва, Россия</p> | 208 |
| 82 | <p>Серков Н.А., Пась О.В.
 ПЕРСПЕКТИВЫ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ПРЕЦИЗИОННЫХ МНОГОКООРДИНАТНЫХ МАШИН С ЧПУ МЕТОДАМИ ЦИФРОВОЙ КОРРЕКЦИИ НА ОСНОВЕ ИНФОРМАЦИИ О ТОЧНОСТИ ДВИЖЕНИЯ ОСНОВНЫХ УЗЛОВ
 ИМАШ РАН, Москва, Россия; ФГУП «НПО «Техномаш», Москва, Россия</p> | 210 |
| 83 | <p>Скворцов О.Б.
 КОНТРОЛЬ ВИБРАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В УСЛОВИЯХ ПРОЯВЛЕНИЯ РЕЗОНАНСНЫХ ПРОЦЕССОВ
 ИМАШ РАН, Москва, Россия; НТЦ «Завод балансировочных машин», Москва, Россия</p> | 213 |
| 84 | <p>Солдатенков И.А., Муравьева Т.И., Степанов Ф.И., Световой В.Б.
 ОЦЕНКА АДГЕЗИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕТОДОМ ЗАЛИПШЕГО КАНТИЛЕВЕРА: АНАЛИЗ ФАКТОРА ПОВЕРХНОСТНОЙ ШЕРОХОВАТОСТИ
 ИПМех РАН, Москва, Россия; ИФХЭ РАН, Москва, Россия</p> | 216 |
| 85 | <p>Солятов А.А., Сидоренко В.С.
 МЕХАТРОННЫЙ МОДУЛЬ УПРАВЛЕНИЯ АДАПТИВНЫМ ТОРМОЖЕНИЕМ ЭЛЕКТРОВОЗА
 ДГТУ, Ростов-на-Дону, Россия</p> | 219 |
| 86 | <p>Статников И.Н., Фирсов Г.И.
 ПЛАНИРУЕМЫЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ В ЗАДАЧАХ ИССЛЕДОВАНИЯ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ
 ИМАШ РАН, Москва, Россия</p> | 222 |
| 87 | <p>Стащенко В.И., Скворцов О.Б., Троицкий О.А.
 ХАРАКТЕРИСТИКИ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЗАВИСИМОСТИ МЕХАНИЧЕСКОГО ОТКЛИКА ПРОВОДНИКА НА ВНЕШНЕЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ
 ИМАШ РАН, Москва, Россия; НТЦ «Завод балансировочных машин», Москва, Россия</p> | 225 |
| 88 | <p>Стрельникова С.С., Песковец А.В., Самусенко В.Д., Буяновский И.А., Татур И.Р., Багдасаров Л.Н.
 ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ЗАГУЩЕННЫХ СУЛЬФОНАТАМИ КАЛЬЦИЯ
 ИМАШ РАН, Москва, Россия, РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, Москва, Россия</p> | 228 |

- | | | |
|----|--|-----|
| 89 | <p>Токмакова М.А., Новиков А.Н., Родичев А.Ю.
 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ ТВЕРДЫХ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ
 ОГУ, Орел, Россия</p> | 231 |
| 90 | <p>Тюрина С.А., Юдин Г.А., Абузин Ю.А., Преображенская Е.В.
 ПРИМЕНЕНИЕ КВАЗИКРИСТАЛЛОВ В ВЫСОКОНАПОЛНЕННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ
 РТУ «МИРЭА», Москва, Россия; НИТУ «МИСиС», Москва, Россия</p> | 234 |
| 91 | <p>Фесенко Т.Н., Дронова Е.А.
 АНАЛИЗ РАЗРУШЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ТРУБНОГО ПУЧКА ОХЛАДИТЕЛЯ ПРЕСНОЙ ВОДЫ
 ИМАШ РАН, Москва, Россия</p> | 236 |
| 92 | <p>Фетисов А.С., Корнаев А.В.
 ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РОТОРНОЙ СИСТЕМЫ НА ОПОРАХ СКОЛЬЖЕНИЯ ПРИ СМАЗКЕ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИМИ СМАЗОЧНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ
 ОГУ, Орел, Россия</p> | 240 |
| 93 | <p>Хасьянова Д.У.
 ТЕХНОЛОГИЯ РАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБОПРОВОДОВ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ АРМАТУРУ ИЗ СПЛАВОВ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ
 ИМАШ РАН, Москва, Россия</p> | 243 |
| 94 | <p>Хрущов М.М., Буяновский И.А., Самусенко В.Д., Щербаков Ю.И.
 ВОДОРОДСОДЕРЖАЩИЕ АЛМАЗОПОДОБНЫЕ ПОКРЫТИЯ СТАЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ, ЛЕГИРОВАННЫЕ КАРБИДОБРАЗУЮЩИМИ ПЕРЕХОДНЫМИ МЕТАЛЛАМИ И ВЛИЯНИЕ ИХ НА АНТИФРИКЦИОННЫЕ И ПРОТОВОИЗНОСНЫЕ СВОЙСТВА МАСЕЛ
 ИМАШ РАН, Москва, Россия</p> | 246 |
| 95 | <p>Хрущов М.М., Петржик М.И., Антонова О.С.
 СТРУКТУРНОЕ СОСТОЯНИЕ ЛЕГИРОВАННЫХ ХРОМОМ АЛМАЗОПОДОБНЫХ УГЛЕРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ И МЕХАНИЗМ ИХ ПОВЕРХНОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ
 ИМАШ РАН, Москва, Россия; НИТУ «МИСиС», Москва, Россия; ИМЕТ РАН, Москва, Россия</p> | 248 |
| 96 | <p>Цуканов И.Ю., Шкалей И.В.
 ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ УПРУГОГО ЦИЛИНДРА И РЕГУЛЯРНО ШЕРОХОВАТОЙ ПОВЕРХНОСТИ
 ИПМех РАН, Москва, Россия</p> | 252 |
| 97 | <p>Чижиков В.И., Курнасов Е.В.
 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫМИ ОПЕРАЦИЯМИ РОБОТОВ С ПНЕВМОПРИВОДОМ С УЧЁТОМ КОНФИГУРАЦИИ РАБОЧЕГО ПРОСТРАНСТВА
 РТУ «МИРЭА», Москва, Россия</p> | 254 |

- | | | |
|----|---|-----|
| 98 | <p>Чунихин Н.Н.</p> <p>ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТРУИ ТРАНСПОРТИРУЮЩЕГО
ГАЗА НА ФОРМИРОВАНИЕ СЛОЯ МЕТАЛЛА В УСЛОВИЯХ 3D-
ПЕЧАТИ С ИМПУЛЬСНЫМ ЛАЗЕРНЫМ НАГРЕВОМ</p> <p><i>РТУ «МИРЭА», Москва, Россия</i></p> | 257 |
|----|---|-----|

