

УДК 539.622:548.4

ВЗАИМОСВЯЗЬ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ И МИКРОСТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРИБОМАТЕРИАЛА ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ КАЧЕНИИ

В. И. САВЕНКО⁺, О. В. КАРАГИОЗ

Методом маятникового трибометра исследованы изменения трибологических и микроструктурных характеристик трибоматериала в процесс циклического качения на примере модельной трибопары “сталь ШХ15 — монокристалл фторида лития”. Показана ключевая роль микропластической деформации трибоматериала в этом процессе.

Ключевые слова: маятниковый трибометр, трение качения, упругий гистерезис, дислокации.

Введение. В работе [1] было показано, что метод маятникового трибометра (ГОСТ 23.214–83) может успешно применяться для анализа основных физических механизмов поглощения энергии в процессах, связанных с циклическим качением. Отмечено, что при использовании данного метода испытаний квазиупругих тел наиболее универсальной формой диссипации энергии в трибо-системе являются потери, обусловленные упругим гистерезисом (внутренним трением) материала в приповерхностных слоях контактирующих трибоэлементов. Многочисленными исследованиями (см., например, [2]) установлено, что источником внутреннего трения в материалах являются элементарные акты локального микропластического деформирования кристаллической решётки твёрдого тела, протекающие при напряжениях, не превосходящих его макроскопический предел текучести. Детальному исследованию микропластической деформации, возникающей в контакте при качении шара по плоской поверхности монокристалла, посвящены работы [3–12]. Однако их авторы исследовали либо одностороннее влияние геометрических и кинематических условий процесса качения на микроструктуру материала [4, 5, 8, 9], либо анализировали связь между эволюцией напряженно-деформированного состояния и изменением силы трения качения при сравнительно малом (порядка десяти) числе проходов шара по дорожке качения в условиях, близких к квазистатическому контакту [5, 6], или, наконец, ограничивались анализом поведения триботехнических (феноменологических) характеристик процесса [8–12].

Цель работы — исследовать взаимосвязь между фрикционными характеристиками трибопар и параметрами микропластической деформации, возникающей и эволюционирующей в материале трибоконтакта в процессе качения при многоцикловых испытаниях — с использованием стандартного маятникового метода [1].

Материалы и методы исследований. Изучали поведение модельных трибопар, содержащих в качестве контактирующих элементов стальные шары, перекатывавшиеся по плоским монокристаллическим образцам фторида лития.

Шары были изготовлены из износостойкой стали ШХ15 (ГОСТ 3722–81) и имели следующие характеристики: радиус шаров $R = 6,15 \pm 0,01$ мм; средняя высота микронеровностей профиля поверхности $R_z = 0,05$ мкм; микротвёрдость $H_\mu = 10,0 \pm 0,1$ ГПа.

Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина РАН. Россия, 119071, г. Москва, Ленинский просп., 31, корп. 4.

⁺ Автор, с которым следует вести переписку. e-mail: visavenko@rambler.ru.

Образцы фторида лития представляли собой прямоугольные призмы размерами $20 \times 10 \times 5$ мм, приготовленные раскалыванием по плоскостям спайности $\{001\}$ единого монокристаллического блока. Механические и структурные характеристики образцов фторида лития были следующими: микротвёрдость $H_{\mu 0} = 1,22 \pm 0,04$ ГПа; плотность ростовых дислокаций $\rho_0 = 10^{+4}$ см $^{-2}$; средний размер микроблоков мозаики $\lambda = 120 \pm 15$ мкм; $R_z = 0,02$ мкм (без учёта ступеней скола). Среднее расстояние между ступенями скола составляло $\Lambda = 200\text{—}300$ мкм, а их высота $\Sigma \leq 0,1\text{—}0,3$ мкм.

Выбор для исследования данной контактной пары был обусловлен, с одной стороны, значительной разницей в жёсткости материалов, использованных в качестве её трибоэлементов. Это позволило пренебречь упругой деформацией и износом стальных сфер в процессе опытов, ограничиваясь анализом состояния монокристаллических образцов. С другой стороны, употребление монокристаллов фторида лития в качестве анализируемого элемента трибопары было связано также и с чисто методическими преимуществами: его достаточно высокой водостойкостью и наличием сравнительно хорошо разработанной технологии выявления в этом материале дислокационной микроструктуры [13].

Опыты осуществляли при качении шаров вдоль кристаллографического направления $\langle 100 \rangle$ в решётке монокристаллов. Испытания проводили в вакууме не хуже 10^{-2} Па на стандартизированной установке [1]. Рабочим телом установки являлся горизонтальный двухопорный физический маятник, имевший в качестве опор качения вышеописанные трибоэлементы (рис. 1). Измерительно-регистрирующая система обеспечивала возможность автоматической фиксации амплитуды свободных колебаний маятника α , а также их периода T на всех стадиях колебательного процесса. Геометрические и силовые параметры маятниковой системы выбирали таким образом, чтобы первоначальное контактное давление в опорах несколько превышало предел пропорциональности на деформационной кривой монокристаллов. Такой выбор граничных условий позволял детально анализировать эволюцию микроструктуры материала и его трибохарактеристик в процессе обратного перехода от микропластического к квазиупругому контакту — при релаксации напряжений в приповерхностном слое кристаллов и/или при его упрочнении в процессе циклического качения.

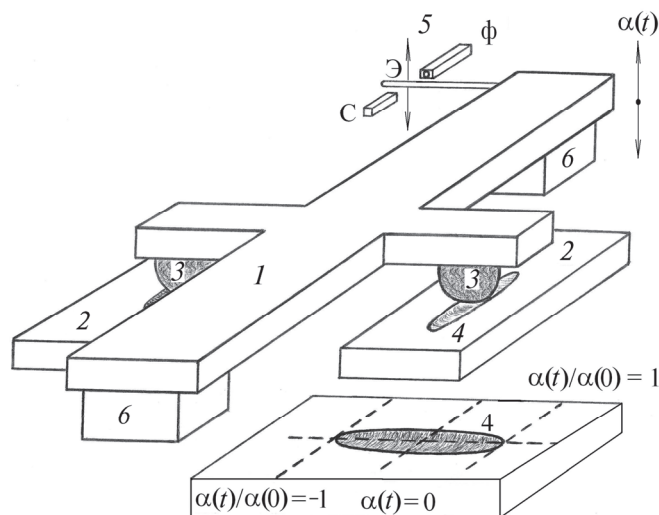


Рис. 1. Принципиальная схема маятникового трибометра. 1 — тело маятника; 2 — плоские образцы; 3 — сферические опоры; 4 — дорожка качения; 5 — оптическая ячейка системы регистрации амплитуды колебаний; С — светодиод, Ф — фотодиод, Э — непрозрачный экран; 6 — балансировочные грузы

Для устранения дестабилизирующего влияния ступеней скола на процесс качения перед каждой серией испытаний проводили небольшую предварительную приработку контактных пар, частично сглаживающую высоту ступеней. Опыты показали, что такая приработка обычно занимала

от 10 до 20 полных колебаний маятника. Максимальный угол вдавливания ψ после приработки не превышал 0,02 рад, а контактное давление составляло $P_0 = 0,15\text{--}0,25$ ГПа (см. табл. 1).

Таблица 1. Геометрические и силовые характеристики трибоконтакта “сталь ШХ15 — фторид лития” как функции циклического воздействия

Номер цикла	$N^{(b)}$	$N^{(l)}$	$\alpha^{(b)}$, мкм	$\alpha^{(l)}$, мкм	$\psi^{(b)}$, 10^{-2} рад	$\psi^{(l)}$, 10^{-2} рад	$P_0^{(b)}$, МПа	$P_0^{(l)}$, МПа
0	Статический контакт			68	—	1,1	—	324
1	Первый проход			72	—	1,2	—	289
1	Вблизи предела пропорциональности			12,3	—	0,2	—	70
1	32	23	80	111	1,3	1,8	234	122
2	81	49	92	123	1,5	2,2	177	99
5	310	130	148	228	2,4	3,7	69	29
6	390	160	154	240	2,5	3,8	63	26
10	710	240	166	275	2,7	4,4	54	21
12	880	280	172	295	2,8	4,5	51	17

Примечание: масса маятника во всех экспериментах составляла $M = 941$ г.

Сразу после приработки осуществляли полный цикл затухания колебаний маятника до окончательной остановки последнего. Такой цикл обычно состоял из нескольких тысяч индивидуальных колебаний (проходов). По завершении первого цикла маятник раскачивали вновь на той же дорожке с помощью специального устройства без нарушения вакуума до первоначальной амплитуды, затем проводили следующий цикл затухания колебаний и т. д. до достижения установленного числа циклов, составлявших одну серию. Период колебаний маятниковой системы на протяжении всех опытов оставался практически постоянным и равным $T = 3,67 \pm 0,05$ с. После проведения серии циклов образцы фторида лития изымали из установки, их поверхность подвергали оптическому микроанализу, выявлявшему форму и размеры дорожки качения, состояние её поверхности, а также другие особенности морфологии контакта. Затем проводили “томографическое” исследование дефектной структуры материала в области дорожки. Для этой цели образцы послойно раскалывали на пластины перпендикулярно направлению качения и немедленно подвергали избирательному химическому травлению в насыщенном растворе хлорного железа в воде [13]. Травление выявляло дислокационную структуру зон микропластической деформации материала в объёме вокруг дорожки качения. На основе измерения геометрических параметров этих зон и их усреднения по совокупности образцов строили обобщённую объёмную картину всей пластически деформированной области, окружавшей дорожку качения на разных стадиях процесса многоциклового затухания колебаний маятника. На рис. 2 в качестве примера приведены микрофотографии дорожки качения, а также её типичных “томографических” сколов после их избирательного травления, а также обозначены основные характеристики областей микропластической деформации в объёме вокруг неё.

Результаты исследований и их обсуждение. Типичная серия кривых затухания колебаний маятникового трибометра приведена на рис. 3. Каждая кривая представляет собой полный цикл затухания колебаний и описывает постепенное уменьшение амплитуды от максимального значения $\alpha(0)$ до полной остановки маятника $\alpha(t) = 0$.

Необходимо отметить, что в описываемых опытах сила трения качения в общем случае может состоять из трёх компонент [17]: $Fr = Fr(S) + Fr(P) + Fr(H)$, где $Fr(S)$ — составляющая силы трения качения, обусловленная микропроскальзыванием по Хизкоуту, $Fr(P)$ — составляющая силы трения качения, обусловленная пластическим смятием шероховатостей поверхности, $Fr(H)$ — гистерезисная составляющая силы трения качения. Соответственно, суммарный коэффициент трения выражается соотношением:

$$fr = fr(S) + fr(P) + fr(H). \quad (1)$$

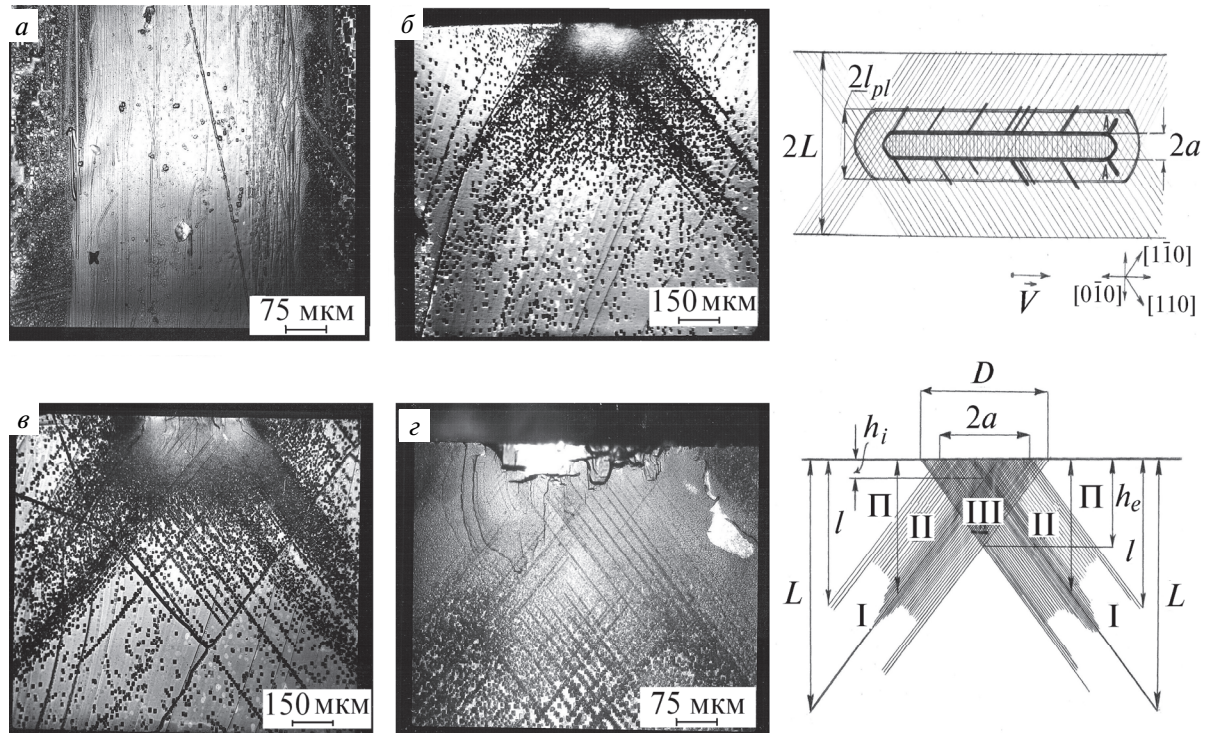


Рис. 2. Дорожка качения (а) и дислокационные структуры различных областей микропластической деформации в центральном сечении, перпендикулярном дорожке, после двух (б), шести (в) и двенадцати (г) циклов колебаний маятника. Справа — схемы зонной структуры пластически деформированной области трибоконтакта. Приведены обозначения геометрических характеристик этих зон

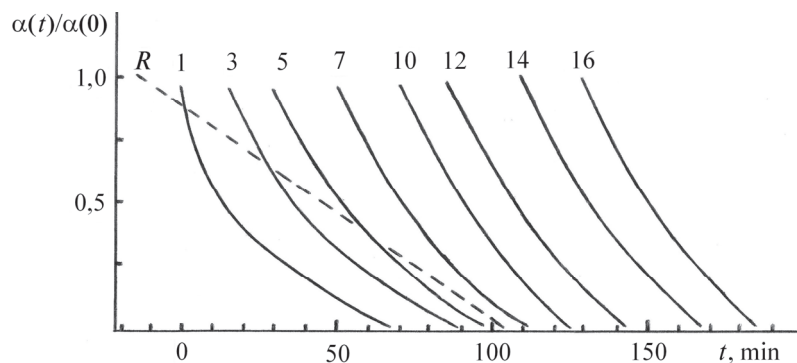


Рис. 3. Зависимости амплитуды колебаний маятникового трибометра $\alpha(t)$ от времени наблюдения t для одной серии циклов затухания. Номер кривой соответствует номеру цикла. Штриховая линия получена для тех же циклов 1—12 на предварительно обкатанных образцах, кривые затухания колебаний на которых в этом случае совпадают

Опыты показали, что кривые затухания каждой серии имеют чётко выраженную стадийную структуру. При этом число стадий на кривых, очерёдность их появления и длительность зависят от номера цикла (см. рис. 4). Так, кривые затухания циклов, открывающих каждую серию, могут содержать несколько небольших стадий первого типа. Их присутствие связано с остаточной микрошероховатостью (остаточной микроступенчатостью $\Delta\Sigma$) поверхности качения и обусловлено преобладанием члена $fr(P)$ в соотношении (1), связанного с микропластической деформацией материала ступенек на дорожке. Выраженные ярче всего в первом цикле при амплитудах колебаний, близких к максимальной, стадии этого типа при переходах к следующим циклам — по мере сглаживания указанных микрошероховатостей (т. е. при $\Delta\Sigma \rightarrow 0$), довольно быстро сливаются в одну общую стадию типа II (вторую стадию), заполняющую собой почти все время цикла затухания. Ко времени их слияния на кривой затухания, в дополнение ко второй — основной стадии, появляется следующая за ней по ходу цикла и завершающая его в данных опытах стадия типа III (третью ста-

дию). По мере возрастания номера цикла длительность последней заметно увеличивается за счёт сокращения стадии II, достигая к 10—12-ому циклам примерно половины от общей продолжительности цикла.

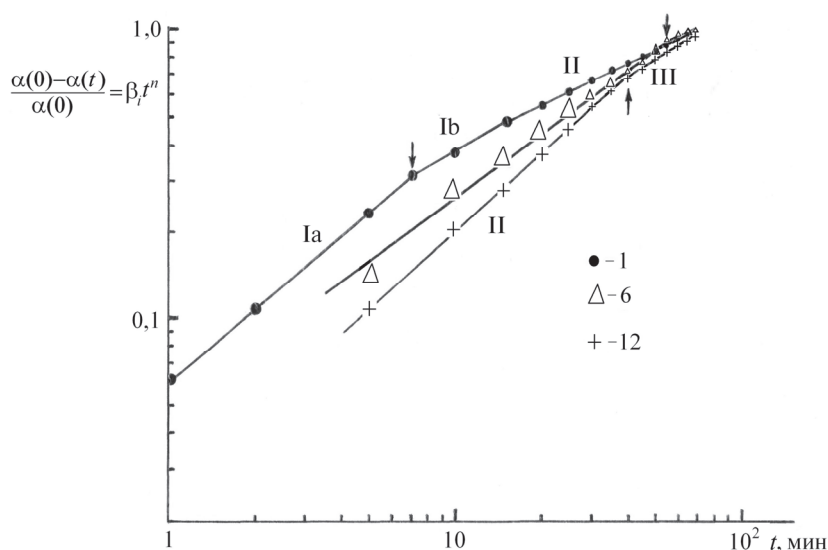


Рис. 4. Относительное изменение амплитуды колебаний маятникового трибометра от времени наблюдения на разных стадиях процесса затухания. Арабские цифры у точек соответствуют номерам циклов, римские — номерам стадий

Анализ показывает, что любая стадия цикла затухания может быть описана степенным законом универсального вида:

$$\alpha(t) = \alpha(0)(1 - \beta t^n). \quad (2)$$

Однако численные значения показателей β и n в этом соотношении для каждой из стадий оказываются существенно различными (см. рис. 4 и табл. 2).

Таблица 2. Параметры уравнения (2) для различных стадий процесса затухания колебаний

Номер цикла	n_I		n_{II}	n_{III}	β_I, c^{-n_I}		$\beta_{II}, c^{-n_{II}}$	$\beta_{III}, c^{-n_{III}}$
	а	б			а	б		
1	0,88	0,67	0,48	—	2,0	5,1	18,0	--
6	—	—	0,75	0,53	—	—	2,2	12,0
12	—	—	0,90	0,62	—	—	0,63	5,4

Вместе с тем, по мере возрастания числа циклов, значения показателей n_{II} и n_{III} приближаются к 1, а коэффициенты β_{II} и β_{III} существенно уменьшаются, так что кривые затухания колебаний приобретают в целом все более прямолинейную форму. После семи-восьми циклов вид соответствующих зависимостей как правило надолго стабилизируется, оставаясь практически неизменным на протяжении десятков циклов, вплоть до появления следов усталостного разрушения материала на поверхности дорожки качения. На рис. 5 в качестве примера приведены зависимости суммарного коэффициента трения f_r от относительной амплитуды колебаний $\alpha(t)/\alpha(0)$, рассчитанные для соответствующих стадий некоторых циклов затухания при помощи известного соотношения [1]:

$$f_r(t) = [\alpha(t) - \alpha(t + T)]/4. \quad (2)$$

Они показывают, что по мере возрастания номера цикла различия между значениями f_r на второй и третьей стадиях заметно уменьшаются в результате их взаимного сближения.

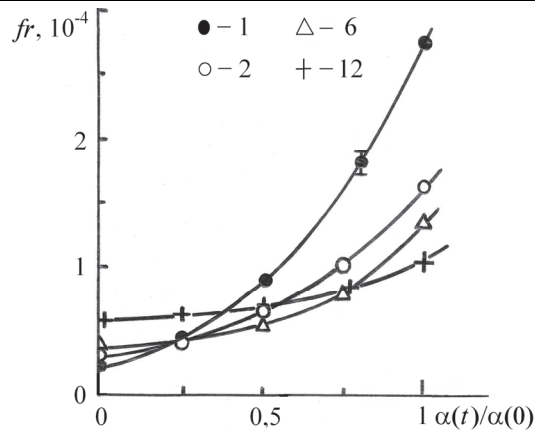


Рис. 5. Зависимость суммарного коэффициента трения fr от относительной амплитуды колебаний маятника $\alpha(t)/\alpha(0)$ на разных стадиях процесса затухания. Цифры у символьных обозначений точек соответствуют номерам циклов

Следует отметить, что на кривых затухания колебаний, полученных для рассматриваемой контактной пары, фактически отсутствует ещё одна, традиционно наблюдаемая при качении стадия, являющаяся обычно в каждом цикле заключительной [5]. Для многих материалов она характеризуется экспоненциальным уменьшением амплитуды колебаний маятника во времени и наблюдается в трибопарах качения при малых амплитудах $\alpha(t) \ll a = \psi R$. Выполненный для этого случая ранее в [15] анализ механизма диссипации энергии колебательной системы показывает, что появление экспоненциального закона затухания в конце цикла происходит в условиях перехода от перекатывания шаровых элементов опор к их покачиванию (совместно с прилипшим к ним приповерхностным слоем приконтактной зоны) вокруг положения статического равновесия системы, что возможно лишь при наличии достаточно высокой адгезии между контактирующими телами. Таким образом, отсутствие вышеупомянутой стадии на кривых затухания пары “сталь — фторид лития” в условиях данных опытов может служить косвенным доказательством незначительности вклада в диссипацию энергии маятникового трибометра канала, связанного с адгезионной (молекулярной) составляющей силы трения чистого качения, обусловленной прочностью межмолекулярных связей на разрыв. Это, однако, отнюдь не означает отсутствия для данной контактной пары адгезионной составляющей коэффициента трения скольжения, обусловленной прочностью межмолекулярных связей на сдвиг (подробнее об этом см. сообщение II).

Параллельно исследованиям закономерностей изменения амплитуды колебаний на разных стадиях процесса затухания в данной работе также анализировали эволюцию геометрических характеристик дислокационной структуры материала в пластически деформированных областях вокруг дорожки качения. В соответствии с физическим смыслом характеристик этой структуры (см. рис. 2), при анализе их целесообразно объединить в три группы. В первую группу войдут такие характеристики приконтактной области, как a и h_e . Они определяют границы предельно упрочнённой зоны III. Именно в этой зоне после нескольких сотен начальных колебаний маятника в первом же цикле затухания в результате многократного взаимодействия дислокаций, принадлежащих различным пересекающимся системам скольжения, создаётся плотная дислокационная сетка, активно тормозящая дальнейшее пластическое погружение шаровых опор в приповерхностный слой образцов. При этом материал в зоне III оказывается в состоянии, близком к поликристаллическому. Поверхность “томографического” скола исследованных образцов уже после нескольких первых циклов затухания приобретает в этой зоне вид, характерный для транскристаллитного разрушения грубозернистой полидисперсной структуры (см. рис. 2, ε).

Во вторую группу следует объединить характеристики II и D. Они определяют размеры поперечного сечения зоны II, в пределах которой в приповерхностном слое образца осуществляется интенсивный процесс микропластического деформирования материала — коллективное движение

дислокационных скоплений в полосах скольжения $\{110\}<110>$. Дислокации в указанных скоплениях распространяются в плоскостях, принадлежащих к ограниченному числу возможных в ГЦК-решётке кристаллографических систем. Состояние материала в зоне II соответствует его поведению в области так называемого “лёгкого” скольжения на кривой “напряжение-деформация” при одноосном растяжении образца.

В третью группу входят характеристики L и l , в неявном виде определяющие стартовые напряжения дислокаций, лидирующих в полосах скольжения [16]. Эти полосы образуются при пластическом погружении в материал сферических опор, соответственно, в самом начале (L) и в конце (l) процесса формирования дорожки качения. Указанные характеристики определяют размеры области неупругости материала (зона I), в которой активны лишь единичные источники дислокаций, и поведение материала, находящегося пока ещё в состоянии, близком к упругому, демонстрирует лишь небольшие отклонения от закона Гука.

Наконец, величина h_i определяет глубину залегания того дислокационного источника, который первым вступил в работу при переходе от упругого к микропластическому режиму деформирования материала под шаровой опорой-индентором. Как известно (см., например, [4]), величина $2h_i$ близка к радиусу герцевского контакта в момент упругопластического перехода в материале. Очевидно, при последующем нарастании пластической деформации с увеличением числа циклов значение h_i не должно меняться. Опыт подтверждает это заключение. На рис. 6 представлены построенные методом “томографического” анализа экспериментальные зависимости вышеперечисленных характеристик как функции местоположения точки наблюдения на дорожке качения вдоль ее длины для последовательности циклов затухания. Эти зависимости показывают, что по мере нарастания числа колебаний в цикле, а также с ростом числа циклов происходит плавное увеличение геометрических размеров всех указанных зон.

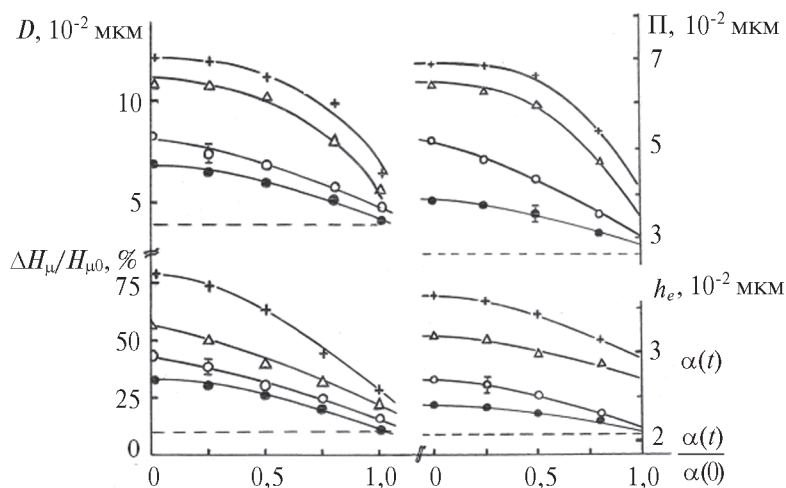


Рис. 6. Зависимости геометрических характеристик дислокационной структуры приконтактной области (D , Π и h_e) и относительное изменение микротвёрдости $\Delta H_\mu/H_{\mu 0}$ на поверхности контакта от относительной амплитуды колебаний $\alpha(t)/\alpha(0)$ для разных циклов затухания. Обозначения номеров циклов те же, что и на рис. 5. Штриховые линии соответствуют характеристикам, полученным после первого прохода

Вместе с тем, в пределах каждого цикла при увеличении его номера наблюдается уменьшение градиента численных значений характеристик дислокационной структуры вдоль направления качения. Это уменьшение выражено особенно заметно вблизи положения равновесия маятника на дорожке, т. е. при $\alpha(t)/\alpha(0) \approx 0$. Напротив, на концевых участках дорожки, при $\alpha(t)/\alpha(0) \approx 1$, градиент геометрических параметров дислокационной структуры вдоль направления качения при переходе от цикла к циклу возрастает. Как и следовало ожидать, это обстоятельство является следстви-

ем накопленной разницы в числе проходов маятника на центральных и концевых участках дорожки качения (см. табл. 1).

Измерения микротвёрдости приповерхностного слоя материала на дне дорожки качения вдоль ее длины показывают (см. рис. 6), что значение $\Delta H_\mu/H_{\mu 0}$ изменяется симбатно характеристикам дислокационной структуры в приконтактной области.

Сопоставительный анализ данных рис. 4 и 6 также показывает, что при изменениях соответствующих характеристик во времени закон подобия соблюдается отнюдь не всегда. Так, на стадиях типа I кривой затухания колебаний наиболее интенсивно растут значения характеристик L , Π и D , определяющих границы области “лёгкого” скольжения (т. е. границы между зонами I и II). На стадии II кривых затухания скорости роста величин L , D и, в особенности, величины Π несколько замедляются, а плотность дислокаций в линиях скольжения, принадлежащих зоне II, растёт. Это указывает на усиление междислокационного взаимодействия в соответствующих полосах скольжения, свидетельствуя о некотором упрочнении материала в наиболее близкой к поверхности части II-ой зоны. На стадии III циклов с высокими номерами (выше 10—12) скорости роста всех параметров, за исключением Π , окончательно выравниваются за счёт дальнейшего снижения максимальных значений этих скоростей. В то же время параметр Π , определяющий нижнюю границу зоны “лёгкого” скольжения, вообще перестаёт меняться в пределах цикла. Это приводит к относительной стабилизации глубины залегания границ между I, II и III зонами приконтактной области и, по существу, означает, что процесс упрочнения материала вокруг дорожки качения на стадии III кривой затухания существенно замедляется, или даже прекращается совсем.

Выводы. Сопоставление феноменологических параметров процесса качения и микроструктурных характеристик материала в приповерхностном слое дорожки качения показывает их тесную взаимосвязь и эволюционную корреляцию. А именно, изменения в микроструктурных (дислокационных) характеристиках материала в приконтактной зоне находят немедленный нелинейный отклик в изменениях макроскопических (феноменологических) параметров процесса качения, таких, как сила трения и коэффициент трения. Это указывает на принципиальную возможность проведения диагностики состояния материала в трибоконтакте путём оценки значений макроскопических и феноменологических параметров процесса качения на соответствующем этапе работы трибопары. Детальный анализ физических механизмов квазиупругой деформации приповерхностного слоя материала в трибоконтакте, позволяющий проводить указанную диагностику, будет дан в следующем сообщении.

Обозначения

R — радиус шаров; R_z — средняя высота микронеровностей профиля; H_μ — микротвёрдость; $H_{\mu 0}$ — среднее значение микротвёрдости приповерхностного слоя образца фторида лития до испытаний; ρ_0 — плотность ростовых дислокаций в нем; λ — средний размер микроблоков мозаики; Λ — среднее расстояние между ступенями скола; Σ — средняя высота ступеней скола в образце до испытаний; $\alpha(0)$, $\alpha(t)$ — соответственно, начальное значение амплитуды колебаний маятника, и её значение в момент времени t ; T — период колебаний маятниковой системы; a — радиус контакта “сфера — плоскость”; $\psi = a/R$ — угол вдавливания шаровой опоры в плоский образец; M — масса маятниковой системы; $P_0 = Mg/2\pi a^2$ — среднее номинальное контактное давление на дорожке качения; $N^{(b)}$, $\alpha^{(b)}$, $\psi^{(b)}$, $P_0^{(b)}$ — значения соответствующих характеристик в начале каждого цикла — на концах дорожки качения, т. е. при $\alpha(t)/\alpha(0) \approx 0,90—0,95$; $N^{(f)}$, $\alpha^{(f)}$, $\psi^{(f)}$, $P_0^{(f)}$ — то же в конце цикла — в срединной части дорожки вблизи от положения равновесия, т. е. при $\alpha(t)/\alpha(0) \approx 0$; h_e , h_i , Π , D , L , l — геометрические характеристики дислокационной структуры, возникающей в объёме материала вокруг дорожки качения (см. рис. 2); $Fr(S)$ — составляющая силы трения качения, обусловленная микропроскальзыванием по Хизкоуту, $Fr(P)$ — составляющая силы трения качения, обусловлен-

ная пластическим смятием шероховатостей поверхности, $Fr(H)$ — гистерезисная составляющая силы трения качения; $fr(S)$, $fr(P)$, $fr(H)$ — соответствующие составляющие полного коэффициента трения качения; $\Delta\Sigma$ — остаточная микроступенчатость поверхности; n_1 — n_{III} , β_1 — β_{III} — параметры степенного закона затухания амплитуды колебаний (уравнение 2); $H_\mu(\alpha(t))$ — микротвёрдость материала на дорожке качения в точке, соответствующей амплитуде колебаний $\alpha(t)$; $\Delta H_\mu = H_\mu(\alpha(t)) - H_{\mu 0}$

Литература

1. Савенко В. И., Измайлов В. П., Карагиоз О. В., Силин А. А., Щукин Е. Д. Применение маятникового метода для анализа механизмов поглощения энергии при качении // Трение и износ. — 1988 (9), № 2, 211—222
2. Головин И. С. Внутреннее трение и механическая спектроскопия металлических материалов. — М.: МИСиС. — 2012
3. Amateau M. F. and Spretnak J. W. Plastic Deformation of Magnesium Oxide Subjected to Rolling-Contact Stresses // J. Appl. Phys. — 1963 (34), no. 8, 2340—2345
4. Swain M. V. Dislocation Generation Beneath Static and Rolling Sphere // Wear. — 1978 (48), no. 1, 173—180
5. Зайцев О. В. Напряженно-деформированное состояние в зоне контакта и сопротивление качению при многократном прокатывании // Трение и износ. — 1985 (6), № 6, 1048—1054
6. Чепя П. А. Деформируемость материала при качении индентора в условиях начального пластического контакта // Трение и износ. — 1991 (12), № 3, 495—500
7. Джонсон К. Л. Пластическое течение поверхностей при циклическом качении и скольжении // Трение и износ. — 1992 (13), № 1, 15—20
8. Джилавдари И. З., Ризноокая Н. Н. Феноменологическая теория микрокачаний шарика на пятне контакта // Трение и смазка в машинах и механизмах. — 2010 (5), № 1, 3—12
9. Буланов Э. А. Трение качения шара по плоскости при пластических деформациях // Трение и смазка в машинах и механизмах. — 2014 (9), № 1, 11—14
10. Таранова Е. С., Комиссарова В. В., Сосновский Л. А. Трение и смазка при качении: методы экспресс-анализа и некоторые закономерности // Актуальные вопросы машиноведения. — 2016, № 5, 169—172
11. Караваев Ю. Л., Клековкин А. В., Килин А. А. Динамическая модель трения качения сферических тел по плоскости без проскальзывания // Нелинейная динамика. — 2017 (13), № 4, 599—609
12. Мифтахова А. Р. Контактная задача о качении с проскальзыванием для вязкоупругих тел // Трение и износ. — 2018 (39), № 1, 71—79
13. Пшеничников Ю. П. Выявление тонкой структуры кристаллов. — М.: Металлургия. — 1974
14. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. — М.: Мир. — 1989 (Johnson K. Contact mechanics. — Cambridge University Press. — 1987)
15. Izmailov V. P., Karagioz O. V., and Shakhparonov V. M. Hysteresis Losses in Oscillatory Systems // Intern. Journ. of Non-Linear Mechanics. — 2015 (77), no. 1, 307—311
16. Савенко В. И., Щукин Е. Д. Характеристики микропластичности ионных кристаллов при контактных воздействиях // Физика твердого тела. — 2012 (54), № 11, 2118—2121

Поступила в редакцию 22.11.18.

После доработки 09.07.19.

Принята к публикации 09.07.19.

Savenko V. I. and Karagioz O. V. **Interrelation of Tribological and Microstructural Characteristics of Tribomaterial under Cyclic Rolling.**

The evolution of macroscopic tribological and microstructural-morphological characteristics describing the process of multi-cyclic rolling in the model tribopair “wear resistant steel SHH15 (GB analogues — 2S135, 534A99, 535A99, US analogues — 52100, G52986, J19965) — lithium fluoride single crystal” is investigated by the pendulum tribometer method. The key role of microplastic deformation in this process is shown.

Keywords: pendulum tribometer, rolling friction, elastic hysteresis, dislocations.