

**Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации**
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования
**«Владимирский государственный
университет
имени Александра Григорьевича
и Николая Григорьевича Столетовых»
(ВлГУ)**
600000, г. Владимир, ул. Горького, 87
Тел. (4922) 53-25-75, 47-97-37, 33-13-91
Факс (4922) 53-25-75, 33-13-91
E-mail: oid@vlsu.ru

ОТЗЫВ
**официального оппонента на диссертацию на
соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук**
Хоменко Максима Дмитриевича
**на тему: «Сопряженные процессы
теплопереноса, конвекции и формирования
микроструктуры при лазерной наплавке с
коаксиальной подачей металлических
порошков», по специальности 05.27.03
«Квантовая электроника».**

Лазерная наплавка (ЛН) с коаксиальной подачей металлических порошков - это перспективная аддитивная технология, позволяющая производить готовые металлические изделия произвольной формы методом послойного нанесения материала. В настоящее время аддитивное производство предъявляет повышенные требования к качеству получаемого изделия и соблюдению технологических режимов. Процесс ЛН является многофакторным: большое значение для свойств синтезированных изделий имеют, как характеристики лазерного излучения, так и параметры потока частиц порошка. Поэтому задача определения оптимальных режимов процесса для достижения целевых параметров материала и изготавливаемого изделия требует глубокого понимания всего комплекса сопровождающих процессов тепломассопереноса и фазовых превращений, разработки их физико-математических моделей и применения методов численного моделирования.

В этом контексте диссертация М.Д. Хоменко посвящена **актуальным** исследованиям сопряженных лазерно-индуцированных явлений теплопереноса, гидродинамики расплава и кинетики затвердевания в лазерном аддитивном

процессе наплавки. Разработан **новый** термо-кинетический подход к проблеме, позволяющий изучать эволюцию микроструктуры изготавливаемого изделия при лазерной наплавке без использования разномасштабного подхода и явного определения формы наплавляемого валика.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы из 122 наименований и приложения. Работа изложена на 123 страницах, включает 83 рисунка и 13 таблиц.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации и сформулированы её цели, подчёркнута научная новизна и практическая значимость, обоснована достоверность применяемых подходов и приведены положения, выносимые на защиту. Также приведены сведения об апробации работы и личном вкладе автора.

В **первой** главе дан подробный и актуальный обзор существующих моделей лазерной наплавки, а также сопутствующих физических процессов. Рассмотрены процессы лазерной наплавки на уровне одиночной дорожки, в особенности, посвященные конвективному переносу тепла в ванне расплава, основные модели кинетики нуклеации и анализа микроструктуры наплавленного слоя.

Вторая глава посвящена исследованию связанных процессов теплопереноса и кинетики затвердевания при лазерной наплавке. Описан термо-кинетический подход к моделированию ЛН, который включает в себя сопряженные нелинейное уравнение теплопроводности и кинетическое уравнение Колмогорова-Джонсона-Мейла-Аврами. Свободная поверхность ванны расплава отслеживается при помощи функции уровня. Усредненный по частице порошка коэффициент поглощения излучения рассчитывается при помощи формул Френеля, а поступающий на подложку поток тепла – при помощи закона Бугера.

Учет кинетики фазового превращения предсказывает расхождение профилей полей температуры и объемных долей новой фазы. Показано качественное различие пространственно-временного поведения процесса

объемной кристаллизации расплава при низкой и высокой скорости охлаждения. В рассмотренных условиях разработанная модель прогнозирует неоднородную динамику полей температуры и объемных долей новой фазы в зоне наплавки. Об адекватности предложенной численной модели говорит удовлетворительное соответствие численных результатов экспериментальным данным.

В **третьей** главе исследуется роль теплопроводности, капиллярных и термокапиллярных явлений в процессе лазерной наплавки. Для этого термокинетическая модель развита для учета конвективного течения жидкости в ванне расплава. Система уравнений в частных производных, состоит из уравнений неразрывности, теплопроводности, количества движения и эволюции свободной поверхности. Новизной гидродинамической части модели является учет захвата частиц только жидкой ванной расплава. Приводится алгоритм и численная реализация разработанной модели.

При помощи численной модели исследуется влияние геометрии теплоотвода детали. Определены параметры процесса наплавки для поддержания заданной ширины и высоты валика при изменении геометрии отвода тепла. Отсутствие теплоотвода поперек сканирования пучка при наплавлении на тонкую стенку приводит к тому, что ванна расплава и гидродинамическое течение в ней более развиты против направления движения пучка лазерного излучения, чем при наплавке на массивную деталь при одинаковых параметрах воздействия. Показано, что капиллярные и термокапиллярные силы определяют соотношение высоты и ширины наплавленного валика. Проведено сравнение макроскопических параметров наплавленных валиков и показано, что гидродинамическая модель лучше соответствует экспериментальным данным, чем тепловая.

Четвёртая глава посвящена исследованию характеристик микроструктуры наплавленных валиков при лазерной наплавке. Используется приближение среднего поля для решения уравнения кинетики фазовых превращений, позволяющее рассчитать распределение кристаллитов по размерам, а также их

средний размер в наплавленном валике. В качестве сравнения исследуются сплав алюминия с кремнием AlSi40 и тугоплавкий сплав на основе Ni. Показано, что скоростная кристаллизация алюминиевого сплава, происходящая гетерогенно на частицах кремния, приводит к снижению среднего размера кристаллитов от поверхности ко дну валика. Для лазерной наплавки тугоплавкого сплава на основе Ni численные эксперименты показали возможность управления микроструктурными свойствами валика с сохранением его геометрических размеров.

Научная новизна работы определяется разработкой самосогласованной модель процесса ЛН, учитывающей взаимное влияние явлений переноса тепла и кинетики фазовых превращений. Определением механизма неравномерности распределения среднего размера кристаллитов по высоте наплавленного валика за счет неоднородности скорости охлаждения на поверхности и в глубине наплавленного материала. Демонстрацией эффективности улавливания порошка и формирования микроструктурной структуры за счет разработки новой гидродинамической модели лазерной наплавки, реализованной в пакете OpenFoam.

Практическая значимость результатов диссертации определяется возможностью определения оптимального режима наплавки в схеме с коаксиальной подачей порошка в область лазерного воздействия, что может быть использовано в различных прикладных задачах создания новых материалов для машиностроения, медицины и т.д.

Достоверность полученных результатов и обоснованность выводов подтверждается использованием современных алгоритмов и вычислительных систем, сравнением модельных и экспериментальных данных и публикациями в рецензируемых научных изданиях

Научные положения, выдвинутые на защиту, представляются достаточно **обоснованными**.

Автореферат диссертации адекватно отражает её содержание. По диссертационной работе можно сделать следующие замечания:

Автор любит оперировать абстрактными и обобщенными понятиями, выбирая при этом, зачастую, не самый удачный стиль изложения. Так, например:

на стр. 16 «Многофакторность процесса ЛН затрудняет использование технологии и стимулирует развитие численных моделей.» Какой именно технологии и развитие каких численных моделей?

на стр 19 «Сравнительно недавно стали применяться методы сквозного счета (например, метод функции уровня - level set method) для этих целей ...». В данном случае явно использован неудачный порядок слов.

на стр 33 «Проблема соответствия созданных моделей реальной ситуации также является актуальной задачей». Ранее автор назвал это валидацией и верификацией, что это за понятие «реальная ситуация».

Во второй главе на стр 37, автор пишет: «Общую энергию ЛИ, поглощенную микрочастицей сферической формы нужно вычислять с учетом неравномерного поглощения по поверхности частицы»

Такое утверждение, как минимум, требует начальной оценки диаметра частицы к длине волны падающего излучения.

В Таблице 1 (стр. 39) λ – скорее всего длина волны, но для каких диаметров частиц приведены расчеты остается загадкой, а в пункте 2.3. не указывается для каких длин волн обсуждаются результаты.

У рисунка 12 (стр. 53) нет подписи, качество рисунка затрудняет его восприятие.

В пункте 2.3.2. описанное влияние механизма кристаллизации на температурный интервал фазового перехода оставляет больше вопросов, чем дает ответов. Собственно, усиление кристаллизации за счет наличия в расплаве наночастиц имеет логичное объяснение, за счет того, что наночастицы выступают центрами кристаллизации, но тогда казалось бы естественным продемонстрировать изменение скорости кристаллизации от концентрации наночастиц, как и изменение размера формирующихся кристаллитов.

В главе 3, на стр. 66 идет текст «Для слежения за свободной границей раздела металл - газ используется VOF-подобный метод, опубликованный в [112].»

Корректно было бы хотя бы дать расшифровку названия метода (volume of fluid) или его русский аналог метод ограниченного объема. Более того, использование именно данного метода, позволяющего моделировать состояние свободной поверхности далеко не очевидно.

Описание модели на стр. 67 заканчивается странной фразой «Действие лазерного пучка ограничивается его радиусом», что могло бы быть верным только для определенных случаев, неописанных автором.

Далее на стр. 77 «Скорость сканирования достаточно высокая, поэтому поперечный размер зоны нагрева сравнительно мал ... ». Такое утверждение, требует оценки, при каких условия скорость сканирования в процессе наплавки может считать достаточно высокой, в противном случае это голословное утверждение. Тем более, что на стр. 79 можно встретить оценки такого рода, при различных маневрах движения лазерного луча.

В четвертой главе, в пункте 4.2. на стр. 94 обсуждается скорость зародышообразования и определяются критические значения для роста частиц, из каких соображений выбрано значение количества зародышей $N=1$ и чем это объясняется остается непонятным.

На рисунках 34 и 35 (85 стр.) представлены данные валидации модели, но по представленным данным складывается ощущение, что сравнение модельных и экспериментальных данных проведено всего по трем точкам, в этом случае крайне сложно говорить о корректном сравнении данных. Например, со слов автора получается, что 2750Вт это низкая мощность, а 3750Вт – высокая, чтобы это не означало.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует

паспорту специальности 05.27.03 – «Квантовая электроника» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, а также оформлена, согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Хоменко Максим Дмитриевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.03 – «Квантовая электроника».

Официальный оппонент:

Кандидат физико-математических наук,
Ведущий научный сотрудник каф. Физики и прикладной математики
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Владимирский Государственный Университет имени
Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
КУЧЕРИК Алексей Олегович

Контактные данные:

тел.: 8 (492) 247 77 96, e-mail: kucherik@vlsu.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:

01.04.21 – Лазерная физика

Адрес места работы:

600000, г. Владимир, ул. Горького 87

Владимирский Государственный Университет имени Александра Григорьевича
и Николая Григорьевича Столетовых, Институт прикладной математики,
физики и информатики

Тел.: 8 (492) 247 77 96; e-mail: kucherik@vlsu.ru

Подпись сотрудника Владимирского Государственного Университета имени
Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых А.О. Кучерика
удостоверяю:

Ученый секретарь

Т.Г. Коннова