

ОТЗЫВ официального оппонента
о диссертации 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 с коаксиальной подачей порошков изначально разрабатывалась для получения покрытий с улучшенными механическими или функциональными свойствами и восстановления изношенных поверхностей. Эта наукоёмкая технология даёт ощутимый экономический эффект за счёт возможности локального наращивания поверхности материалом, который может быть отличным от материала основы. Это позволяет значительно улучшать характеристики изделий и/или продлевать срок их службы. Фундаментальные научные вопросы возникают в связи с необходимостью согласования многочисленных технологических параметров, таких как мощность лазерного пучка, расход порошка, скорость сканирования, диаметры перетяжек лазерного и порошкового пучков и положения их фокусов относительно обрабатываемой поверхности. Критериями оптимизации служат устойчивость процесса и однородность наплавленных валиков, микроструктура и свойства наплавленного материала, коэффициент использования порошка и энергетическая эффективность.

В последнее время коаксиальная лазерная наплавка всё чаще используется как аддитивная технология для выращивания объёмных деталей путём многослойной наплавки. Преимущество аддитивных технологий по сравнению с традиционными субтрактивными в экономии материала, возможности получения без сборочных операций сложных, ранее недоступных форм, а также

высокая степень автоматизации, позволяющая получать конечное изделие непосредственно по его электронной модели. Фактически, это слияние материальных технологий с информационными, выводящее производство на качественно новый уровень. Аддитивные приложения лазерной наплавки ставят новые научные задачи. Например, чтобы выдержать геометрические размеры выращиваемой детали, необходимо управлять высотой и шириной наплавляемого валика, которые, кроме технологических параметров, зависят ещё и от геометрии детали и траектории движения наплавочной головки.

Данная диссертация посвящена теоретическому исследованию взаимосвязанных процессов теплопереноса, конвекции и формирования микроструктуры в зоне лазерного воздействия при коаксиальной наплавке. В ней решаются упомянутые выше научные и практические задачи. Эта тематика является безусловно **актуальной**. Разработанные теоретические подходы применимы к сходным аддитивным технологиям, например к селективному лазерному плавлению.

Построение диссертации традиционное. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы из 122 наименований и приложения. Общий объем диссертации – 123 страницы, включая 51 рисунок и 13 таблиц. Каждая глава содержит определенный законченный раздел работы, в конце которого сформулированы выводы.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации и сформулированы её цели, подчеркнута научная новизна и научная и практическая значимость, приведены положения, выносимые на защиту.

В **первой** главе приведён литературный обзор исследований физических процессов при коаксиальной лазерной наплавке и методов их моделирования. Рассмотрены теплоперенос в зоне лазерного воздействия, гидродинамика ванны расплава и формирование её свободной поверхности, возникновение остаточных напряжений, а также формирование микроструктуры материала при затвердевании. Показано, что численное моделирование упомянутых

взаимосвязанных процессов может быть полезно для оптимизации данной технологии.

Вторая глава посвящена моделированию взаимозависимых процессов теплопереноса и фазовых превращений плавления и затвердевания в зоне лазерного воздействия. Теплоперенос описывается уравнением теплопроводности. Гидродинамика ванны расплава не рассчитывается. Для учёта вклада конвективного теплопереноса вводится эффективный коэффициент теплопроводности. Кинетика фазовых превращений описывается уравнением Колмогорова-Джонсона-Мейла-Аврами. Особенность реализованной модели в строгом учёте потоков массы и энергии через поверхность ванны расплава, которые связаны с потоком частиц порошка. Именно поток массы отвечает за рост наплавленного валика. Поверхность валика задается с помощью функции уровня, что позволяет моделировать формирование валика. Лазерный пучок частично поглощается и рассеивается на частицах порошка, находящихся между наплавочной головкой и поверхностью. Это ослабляет его и одновременно нагревает частицы. Таким образом, поток лазерной энергии уменьшается, а поток тепловой энергии, переносимой частицами, увеличивается, что влияет на процесс наплавки. Процессы поглощения и рассеяния на частицах также включены в модель.

Анализ поглощения и рассеяния лазерного излучения частицами порошка показал, что этими процессами можно управлять независимо от массового расхода порошка. Например, увеличение скорости частиц и их размеров при постоянном массовом расходе уменьшает поглощение и рассеяние. Численное моделирование предсказывает значительные перегрев при плавлении и переохлаждение при затвердевании, что существенно смещает фронты фазовых переходов относительно изотермы плавления. Таким образом, показано, что в рассмотренных условиях кинетика фазовых переходов оказывает влияние на форму ванны расплава и теплоперенос в зоне лазерного воздействия. Модель провалидирована сравнением рассчитанной формы валика с экспериментально измеренной.

Замечание по второй главе: параметр ξ в уравнениях (24)-(26),(28) и на Рис. 8 – это оптическая толщина. Обсуждение этой физической величины могло бы улучшить восприятие работы, хотя на сути полученных результатов это не сказывается.

В **третьей** главе моделируются взаимосвязанные процессы теплопереноса и гидродинамики ванны расплава. Для этого численно решается система уравнений в частных производных, состоящая из уравнений непрерывности, Навье-Стокса и энергии. В уравнении энергии учитываются как кондуктивный, так и конвективный потоки тепла. Кинетика фазовых переходов не рассчитывается. Для учёта поглощения/выделения скрытой теплоты при плавлении/затвердевании предполагается, что объёмная доля жидкой фазы линейно зависит от температуры в интервале между температурами солидуса и ликвидуса. Для численного расчёта движения свободной поверхности расплава применяется метод VOF. Особенностью данной модели является возможность задания краевого угла смачивания расплава.

Модель провалидирована сравнением рассчитанной геометрии валика с экспериментальными данными. Показано, что течение расплава изменяет соотношение между шириной и высотой валика. Включение в модель гидродинамики расплава позволяет добиться лучшего соответствия с экспериментом. С помощью численного моделирования исследовано влияние геометрии теплоотвода и краевого угла смачивания на геометрию валика. Рассмотрены три типичные геометрии теплоотвода: валик в середине массивной подложки, валик на краю массива и валик на тонкой стенке. Также исследовалось влияние резких поворотов валика. На основании моделирования предложена стратегия изменения параметров процесса в зависимости от геометрии теплоотвода для поддержания постоянной геометрии валика. Численно исследовано влияние краевого угла смачивания на геометрию наплавленного валика. Выявлен различный характер этой зависимости при различных соотношениях ширины ванны расплава и ширины потока порошка. Это даёт дополнительные возможности управления геометрией валика.

Замечание по третьей главе: в конце страницы 73 написано: «В расчетах ванна расплава в среднем укладывается в 100 ячеек ..., что позволяет рассчитывать течения с числом Рейнольдса до 10^4 при помощи схем второго порядка». Хотелось бы узнать обоснование такой оценки предельного числа Рейнольдса. Возможно, просто ссылку на источник, где есть это обоснование. А какой диапазон изменения числа Рейнольдса в данной работе?

В **четвёртой** главе проведены расчёты микроструктуры путём численного решения уравнения кинетики фазовых переходов в приближении среднего поля РКЖМА, сопряжённого с уравнением теплопереноса. Показано, что распределение зёрен по размерам может быть широким и даже бимодальным. Численные эксперименты выявили измельчение зерна от центра к периферии валика и при увеличении скорости сканирования, что непосредственно связано с увеличением скорости охлаждения. Эти тенденции соответствуют наблюдаемым экспериментально. Таким образом, разработанную модель можно использовать для предсказания и оптимизации структуры при лазерной наплавке. Проведённые расчёты предлагают, в частности, стратегию согласованного изменения технологических параметров, позволяющую изменять средний размер зерна в широком диапазоне при практически неизменной геометрии валика.

Замечания по четвёртой главе:

1. При описании Рис. 39 в тексте диссертации сказано, что структура зёрен ячеистая. На мой взгляд, в нижней части Рис. 39 (а) и (в) имеются также столбчатые зёрна. Какова вероятность, что ячейки, видимые в сечении как равноосные, на самом деле являются поперечными сечениями столбчатых зёрен?

2. На стр. 91 написано: «Силумин содержит нерастворенные частицы кремния с размером порядка 5 мкм. Считается, что кристаллизация кремния происходит на этих частицах по гетерогенному поверхностному механизму...» В данном контексте имеется в виду, что расплав силумина содержит твёрдые частицы кремния. Согласно Таблице 2, в диссертации исследуется силумин

(сплав алюминия с кремнием), содержащий 11,5 вес.% кремния. Это практически эвтектический состав. Согласно диаграмме состояния алюминий-кремний, в равновесном расплаве такого состава твёрдых частиц кремния не содержится. В связи с этим хотелось бы более подробного обсуждения возможности появления центров гетерогенной кристаллизации в расплаве. Связано ли оно с неравновесностью процесса плавления при быстром нагреве лазером?

Автор диссертации использовал в целом ранее известные подходы к математическому моделированию лазерной наплавки. Однако, в его реализации модели есть отличительные особенности, например количественная оценка процессов поглощения и рассеяния лазерного излучения частицами порошка, строгий учёт потоков массы и энергии, переносимых частицами порошка в ванну расплава, введение дополнительного параметра – краевого угла смачивания расплава. Поэтому следует признать, что автор внёс вклад в развитие методов теоретического анализа лазерной наплавки. **Научная новизна** работы определяется как раз вышеупомянутой разработкой физико-математической модели, а также полученными фундаментальными результатами расчётов, выявляющими влияние технологических параметров на форму и микроструктуру валика в условиях лазерной наплавки.

Достоверность полученных результатов и обоснованность выводов диссертационной работы обеспечивается использованием широко известных и апробированных численных методов и моделей, верифицированных сравнением с решением известных тестовых задач. Достоверность предложенных автором модификаций модели лазерной наплавки также не вызывает сомнений, так как полученные результаты расчётов подтверждают экспериментально наблюдаемые тенденции, а новые модели провалидированы путём сравнения с экспериментальными данными. Научные положения, выдвинутые на защиту, также представляются достаточно **обоснованными**.

Практическая значимость результатов диссертации определяется в первую очередь разработанными моделями, которые могут применяться для

оптимизации и динамического управления параметрами лазерной наплавки. Особо следует отметить предложенные стратегию согласования технологических параметров при изменении геометрии теплоотвода и при резких поворотах валика для сохранения неизменной геометрии валика, а также стратегию управления микроструктурой при постоянной геометрии валика. Поддержание стабильной геометрии валика особенно важно в развивающихся сейчас аддитивных технологиях.

Результаты, полученные М.Д. Хоменко в его диссертационной работе, вносят значительный вклад в использование методов математического моделирования в исследовании сопряженных процессов тепло- и массопереноса и кинетики фазовых переходов в зоне лазерного воздействия при коаксиальной лазерной наплавке. На основе проделанных расчётов предложены новые стратегии управления технологическими параметрами. Таким образом, диссертация **содержит решение научной проблемы, имеющей значение для развития лазерных технологий.** Основные результаты опубликованы в престижных рецензируемых международных и российских журналах и доложены на конференциях высокого уровня.

Автореферат диссертации полностью отражает её содержание.

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:

доктор физико-математических наук,

Главный научный сотрудник

Лаборатории инновационных аддитивных технологий

Федерального государственного автономного образовательного учреждения

высшего образования «Московский государственный технологический

университет «СТАНКИН»»

ГУСАРОВ Андрей Владимирович

Контактные данные:

тел.: +7 (499) 973 39 61, e-mail: av.goussarov@gmail.com

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена докторская диссертация:

01.04.21 – Лазерная физика

Адрес места работы:

127055, г. Москва, Вадковский пер., д. 3а

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

Тел.: +7 (499) 973-39-61; E-mail: av.goussarov@gmail.com

30 мая 2019 г.

