



МИНОБРНАУКИ РОССИИ

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
(ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»)**

Вадковский пер., д. 1, Москва, ГСП-4, 127994. Тел.: (499) 973-30-76. Факс: (499) 973-38-85
E-mail: rector@stankin.ru

№ _____

В диссертационный совет 24.2.312.12 на базе
федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Казанский национальный исследовательский
технологический университет»,

420015, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 68

ОТЗЫВ

**официального оппонента Тарасовой Татьяны Васильевны на
диссертационную работу Шварца Ивана Валерьевича «Структура и
свойства материалов на основе нержавеющей сталей и никелевого
сплава, получаемых лазерно-аддитивным методом с ультразвуковым
воздействием», представленной на соискание учёной степени кандидата
технических наук по специальности 2.6.17. Материаловедение**

1. Актуальность темы диссертации

Современное развитие машиностроения и авиакосмической, энергетической и медицинской промышленности диктует необходимость создания изделий сложной геометрии с высокими эксплуатационными характеристиками. Лазерные и аддитивные технологии (в частности, процессы прямого лазерного выращивания) открыли принципиально новые возможности для производства и ремонта ответственных деталей, обеспечивая высокую производительность и гибкость технологических

процессов. Однако, несмотря на очевидные преимущества, широкое внедрение этих методов сдерживается рядом фундаментальных проблем: повышенная пористость готовых изделий, склонность к трещинообразованию, формирование иррегулярной микроструктуры.

В этой связи одним из наиболее перспективных и динамично развивающихся направлений является гибридизация процесса — введение дополнительной ультразвуковой энергии в зону лазерного воздействия. Ультразвуковые колебания способны эффективно влиять на гидродинамику ванны расплава, измельчать зеренную структуру, способствовать удалению газовых включений. Тем не менее, мультидисциплинарность задачи (сопряжение акустики, теплофизики и материаловедения) порождает комплекс нерешённых вопросов: выбор оптимальной схемы подвода ультразвукового воздействия, определение эффективных частот и мощностей, понимание механизмов влияния ультразвуковых колебаний на структурообразование и дефектность для широкой номенклатуры сплавов.

Особую значимость приобретает установление количественных корреляций между параметрами ультразвукового воздействия, формируемой микроструктурой и итоговыми механическими свойствами. Решение этой проблемы позволит перейти от эмпирического подбора режимов к научно обоснованному управлению структурой при лазерно-акустическом аддитивном производстве, включая создание функционально-градиентных материалов.

Таким образом, тема диссертационного исследования, направленная на изучение влияния ультразвукового воздействия на микроструктуру сплавов в процессе лазерно-аддитивного производства и выявление связи микроструктурных изменений с эксплуатационными свойствами, является безусловно актуальной и имеет важное научное и прикладное значение.

2. Анализ содержания диссертационной работы

Диссертация состоит из оглавления, списка сокращений и условных обозначений, введения, 4 глав, заключения, списка литературы. Общий объем диссертации составляет 121 страницу, 49 рисунков, 9 таблиц. Список литературы содержит 131 наименование.

Во введении диссертационной работы автором обоснована актуальность темы, которая заключается в необходимости устранения дефектов (пористости, трещин, неоднородности микроструктуры), возникающих при лазерно-аддитивном производстве, и в перспективности использования ультразвукового воздействия как эффективного способа управления структурообразованием в процессе изготовления изделий с

целью получения бездефектных структур. Четко обозначена цель диссертационной работы - повышение микротвердости, прочности и износостойкости сплавов за счет управления микроструктурой с помощью ультразвукового воздействия в процессе лазерной точечной обработки и прямого лазерного выращивания. Сформулированы задачи исследования по созданию экспериментального оборудования для апробации методов лазерной точечной обработки (ЛТО) и прямого лазерного выращивания (ПЛВ) с ультразвуковым воздействием, разработке методик исследования геометрии ванны расплава и микроструктуры, а также установлению взаимосвязи структурных изменений с механическими свойствами. Показана теоретическая и практическая значимость работы, описаны ключевые методы исследования, а также представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведён аналитический обзор современных лазерных и аддитивных технологий. Показано, что, несмотря на такие преимущества, как высокая производительность и возможность создания сложнопрофильных изделий, эти методы сопровождаются возникновением трёх групп дефектов: 1) внутренние и поверхностные дефекты; 2) иррегулярная и неоднородная микроструктура; 3) остаточные напряжения и деформации. Для каждой группы проанализированы причины образования. Рассмотрены пять основных направлений борьбы с дефектами (оптимизация параметров, применение функционально-градиентных материалов, термообработка, электромагнитное и ультразвуковое воздействие). Наибольшее внимание уделено комбинированным технологиям лазерной сварки и прямого лазерного выращивания с приложением ультразвукового воздействия, что позволяет эффективно управлять структурой, снижать дефектность и повышать физико-механические свойства покрытий и соединений. В конце главы сформулированы два взаимосвязанных направления экспериментальной работы: лазерная точечная обработка с ультразвуковым воздействием без присадочного материала и прямое лазерное выращивание с ультразвуковым воздействием с использованием присадочного материала в виде мелкодисперсного металлического порошка.

Во второй главе диссертации приведены основные характеристики исследуемых материалов, подробно описан состав основного и вспомогательного оборудования, использованного при проведении экспериментов и последующем анализе образцов. Автором детально изложены ключевые параметры процессов лазерной точечной обработки и прямого лазерного выращивания. Особого внимания заслуживает разработанное автором экспериментальное оборудование, позволяющее реализовать лазерную точечную обработку и прямое лазерное выращивание с ультразвуковым воздействием с использованием излучателей Ланжевена

мощностью 100 Вт на частотах 22 и 40 кГц, а также элементы оснастки, изготовленные методом 3D-печати по принципу послойного наплавления термопластичной нити.

Для количественной оценки влияния ультразвуковых вибраций на геометрию ванны расплава при лазерной точечной обработке предложена оригинальная методика полуавтоматического измерения площади поверхности и площади поперечного сечения ванны расплава на основе оптических снимков с применением концепции «область интереса». Для оценки структурных изменений при лазерной точечной обработке разработана методика определения процентного соотношения фазовых составляющих микроструктуры (аустенит и X-фаза, объединяющая феррит, карбиды и другие фазы) с переводом цветных изображений в черно-белый формат. Для процесса прямого лазерного выращивания создана методика количественного анализа размеров столбчатых дендритов на основе метода секущих, реализованная в виде алгоритма, преобразующего растровые снимки в бинарное изображение и строящего гистограммы распределения с определением математического ожидания и среднеквадратического отклонения.

Кроме того, в главе приведён перечень использованного оборудования разного назначения: лазерный дифракционный анализатор Mastersizer 3000 (для определения фракционного состава порошков), вибрационное просеивающее оборудование HAVER EML 315 digital plus (отбор фракции 60–90 мкм), смеситель TURBULA T2F, отрезной и электроэрозионный станки, оборудование для запрессовки и шлифовки (SIMPLIMET XPS1, BUEHLER ECOMET 300 PRO), оптические микроскопы Carl Zeiss, сканирующий электронный микроскоп с EDS-приставкой Auriga CrossBeam, приборы для измерения микротвердости (Tukon 2500), испытания на трение (Универсал-1А) и статическое растяжение (Instron 5854). Представленный в главе объём методических разработок и приборной базы свидетельствует о высокой степени достоверности получаемых экспериментальных результатов.

В третьей главе приведены результаты экспериментального исследования образцов из аустенитной нержавеющей стали AISI 316L, полученных методом лазерной точечной обработки без присадочного материала и с наложением ультразвуковых колебаний частотой 40 кГц и мощностью 100 Вт. Ключевыми параметрами оценки выступали геометрические характеристики ванны расплава (площадь поверхности и площадь поперечного сечения), фазовый состав микроструктуры и микротвердость.

С использованием разработанных во второй главе методик автором установлено, что дополнительное ультразвуковое воздействие приводит к изменению формы поверхности ванны расплава, а именно к увеличению глубины проплавления. Данный эффект объясняется возникновением в ванне расплава областей знакопеременного давления, изменяющих скорость гидродинамических течений, что способствует более глубокому проплавлению материала.

При микроструктурном анализе выявлено, что традиционная лазерная точечная обработка без ультразвукового воздействия формирует ярко выраженные столбчатые дендриты, ориентированные по градиенту температур. Введение ультразвуковых колебаний приводит к трансформации структуры в сторону глобулярной формы. Согласно разработанной методике количественного фазового анализа, определено процентное содержание X-фазы (объединяющей δ -феррит, карбиды и другие фазы). Показано, что в зоне сплавления содержание X-фазы практически не изменяется (относительная разность менее 1 %), тогда как в центральной и смешанной зонах ванны расплава его количество возрастает на 48–52 % при ультразвуковом воздействии. Это свидетельствует об изменении условий кристаллизации и формировании мелкозернистой глобулярной структуры.

Исследование микротвердости показало, что структурные изменения (форма дендритов, увеличение доли δ -феррита) сопровождаются повышением механических свойств: относительная разность максимальных значений микротвердости для образцов, полученных с ультразвуковым воздействием и без него, составила 14,9 % и 12,1 % в зависимости от режима обработки. Полученные результаты подтверждают эффективность ультразвукового воздействия как инструмента управления структурой и свойствами при лазерной точечной обработке.

В четвёртой главе приведены результаты экспериментальных исследований микроструктуры и физико-механических свойств сплавов: аустенитного нержавеющей сплава марки EuTroLoy 16316D.04 и жаропрочного никелевого сплава марки Inconel 625, а также созданного на их основе функционально-градиентного материала. Образцы получены методом прямого лазерного выращивания как традиционным способом, так и с наложением ультразвукового воздействия частотой 22 кГц и мощностью 100 Вт.

С использованием разработанной методики количественного анализа дендритной структуры для аустенитного нержавеющей сплава установлено, что ультразвуковое воздействие приводит к снижению среднеквадратического отклонения размеров столбчатых дендритов на 38,8–65,1 % по сравнению с традиционным процессом прямого лазерного

выращивания, что свидетельствует о формировании более равномерной микроструктуры. Качественный анализ показал переход от вытянутой столбчатой формы дендритов (без ультразвукового воздействия) к ячеистой равноосной (с ультразвуковым воздействием), при этом относительная разность среднего размера столбчатого дендрита составила 22–43 %.

Механические испытания образцов из аустенитного нержавеющей сплава выявили: повышение износостойкости на 26,3 %, увеличение прочности при статическом растяжении на 10,2 % при снижении относительной деформации на 3 %, а также рост микротвердости зоны наплавленного металла на 12,7 % при неизменной микротвердости основного металла.

Для жаропрочного никелевого сплава также подтверждён переход от столбчатой к ячеистой равноосной структуре под действием ультразвука, что сопровождается повышением микротвердости наплавленного металла на 11,1 % при стабильной микротвердости основного металла.

При исследовании функционально-градиентного образца (материал с переходной структурой от 100 % аустенитного нержавеющей сплава к 100 % никелевому жаропрочному сплаву) показано, что ультразвуковое воздействие обеспечивает повышение микротвердости во всех зонах состава на 10,5–14,8 %. Энергодисперсионный анализ выявил, что в образце, выращенном с ультразвуковым воздействием, отсутствуют резкие скачки интенсивности Fe и Ni при переходе между слоями — изменения происходят плавно, тогда как в образце, полученном без ультразвукового воздействия, наблюдаются значительные флуктуации. Относительная разность составляет 10–12%. Это свидетельствует о более гомогенном распределении химических элементов под действием ультразвуковых колебаний.

В заключении подведены основные итоги диссертационной работы и сформулированы ключевые выводы, соответствующие поставленным задачам. Первым выводом отмечена разработка экспериментального оборудования для лазерной точечной обработки и прямого лазерного выращивания с ультразвуковым воздействием (мощностью 100 Вт, частотами 22 и 40 кГц). Вспомогательная оснастка (основания, система охлаждения) спроектирована с учётом конструктивных особенностей излучателей Ланжевена и изготовлена методом FDM-печати, а эффективность передачи ультразвуковых колебаний обеспечена точным сопряжением поверхностей. Второй вывод касается результатов исследования нержавеющей сплава AISI 316L, полученного методом лазерной точечной обработки с ультразвуковым воздействием. Разработана методика оценки геометрических параметров ванны расплава и микроструктуры. Установлено изменение геометрии ванны расплава, формирование мелкозернистой аустенитно-ферритной структуры с

повышенным содержанием X-фазы и повышенным значением микротвердости. Третий вывод посвящён разработанной методике автоматизированного расчёта размеров столбчатых дендритов с построением гистограмм и функций нормального распределения (математическое ожидание, среднеквадратическое отклонение). На основе этой методики для образцов, полученных методом прямого лазерного выращивания с ультразвуковым воздействием, выявлено формирование равномерной мелкозернистой дендритной структуры, что сопровождается повышением микротвердости, прочности при статическом растяжении и износостойкости. Четвёртый вывод посвящён исследованию жаропрочного никелевого сплава в процессе прямого лазерного выращивания с ультразвуковым воздействием. Показано формирование мелкозернистой дендритной структуры и увеличение микротвердости в зоне наплавленного металла при неизменной микротвердости основного металла. Пятый вывод посвящён исследованию функционально-градиентного материала на основе нержавеющей и никелевой сплавов при прямом лазером выращивании с ультразвуковым воздействием (22 кГц, 100 Вт). Установлено, что ультразвуковые колебания приводят к изменению относительного содержания Fe и Ni, уменьшению размеров столбчатых дендритов с переходом к мелкозернистой структуре и повышению микротвердости на каждом структурном слое. Выводы имеют четкое практическое обоснование и подтверждены внедрением результатов в производство.

3. Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Основные научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертационной работе, являются научно обоснованными. Они логически вытекают из результатов проведённых экспериментов и подкреплены корректным применением современных методов исследования.

Достоверность результатов обеспечивается применением современных методик, использованием сертифицированного и поверенного оборудования (оптические микроскопы, сканирующий электронный микроскоп с энергодисперсионным спектрометром, микротвердомер, лазерный дифракционный анализатор и др.), а также статистической обработкой данных и согласованностью полученных результатов с работами других исследователей.

4. Научная новизна диссертационной работы

Научная новизна работы заключается в следующем комплексе полученных результатов:

1. Установлено, что ультразвуковое воздействие частотой 40 кГц и мощностью 100 Вт в процессе ЛТО нержавеющей стали марки AISI 316L приводит к увеличению микротвердости ванны расплава на 12,1-14,9% за счет формирования мелкозернистой аустенитно-ферритной структуры. При этом показано количественное изменение фазового состава микроструктуры с помощью разработанной методики исследования, которая позволила выявить увеличение X-фазы в пределах 48-52%. Разработанная методика исследования геометрических параметров ванны расплава позволила установить максимальное относительное увеличение площади поверхности на 15%, а площади поперечного сечения на 90%.
2. Установлено, что ультразвуковое воздействие частотой 22 кГц и мощностью 100 Вт в процессе ПЛВ нержавеющей стали марки EuTroLoy 16316D.04 приводит к увеличению микротвердости зоны наплавленного металла на 12,7%, прочности при статическом растяжении на 10,2% и коэффициента трения на 26,3% за счет формирования мелкозернистой дендритной структуры. При этом показано количественное изменение размеров столбчатых дендритов с помощью разработанной методики исследования, которая позволила установить уменьшение среднего размера столбчатого дендрита на 22-43%, а также уменьшение среднеквадратического отклонения размеров в пределах от 38,8 до 65,1%, что свидетельствует о более равномерной микроструктуре полученного сплава по сравнению с традиционным способом выращивания.
3. Экспериментально показано, что ультразвуковое воздействие частотой 22 кГц и мощностью 100 Вт в процессе ПЛВ жаропрочного никелевого сплава Inconel 625 приводит к увеличению микротвердости зоны наплавленного металла на 11,1% за счет формирования мелкозернистой дендритной структуры.
4. Установлено, что ультразвуковое воздействие частотой 22 кГц и мощностью 100 Вт при синтезе функционально-градиентного материала на основе металлопорошковых композиций из сплавов EuTroLoy 16316D.04 и Inconel 625 в процессе ПЛВ приводит к увеличению микротвердости в

пределах 10,5-14,8% за счет формирования мелкозернистой равноосной дендритной структуры на всех структурных слоях. Методом энергодисперсионного анализа выявлено сглаживание относительной интенсивности химических элементов Fe и Ni в пределах 10-12% при переходе от одного структурного слоя к другому.

5. Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы

Теоретическая значимость диссертационного исследования заключается в выявлении и обосновании закономерностей влияния ультразвукового воздействия частотой 22 и 40 кГц и мощностью 100 Вт на структурообразование и механические свойства нержавеющей и никелевых сплавов в процессах лазерной точечной обработки и прямого лазерного выращивания.

Практическая значимость работы подтверждается разработкой на языке MATLAB методик (программных кодов) для автоматизированного исследования геометрических параметров ванны расплава, фазового состава сплавов при лазерной точечной обработке, а также размеров оси 1-го порядка дендритных кристаллов при прямом лазерном выращивании. Эти методики отличаются автоматизацией измерений на основе оптических снимков.

Практическая значимость диссертационной работы Шварца Ивана Валерьевича подтверждается внедрением:

– в ФГУП «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» при проведении хозяйственных работ по заказу АО «ТВЭЛ» Разработанные программные методики исследования геометрических параметров ванн расплава и микроструктуры нержавеющей и никелевых сплавов на основе экспериментально полученных оптических снимков образцов были использованы при верификации расчетных подмодулей программного комплекса «Виртуальных 3D принтер», предназначенного для прогнозирования оптимальных параметров работы аддитивных установок.

– в ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ» и используются в учебном процессе при изучении дисциплин «Лазерные акустические технологии», «Материаловедение и технологии материалов»;

6. Оценка содержания диссертации, степень ее завершенности в целом и качество оформления

Диссертационная работа Шварца И.В. представляет собой законченное научное исследование, в котором решена научно-практическая задача. Содержание работы логически выстроено, все разделы взаимосвязаны. Диссертация и автореферат оформлены в полном соответствии с требованиями Положения о присуждении ученых степеней.

7. Подтверждение опубликования основных результатов диссертации в научных изданиях

По теме диссертационного исследования опубликованы 16 работ, в том числе 5 статей в российских рецензируемых научных журналах из перечня ВАК, 1 статья в журнале, индексируемом в Web of Science и Scopus, 6 статей – в других журналах и материалах научных конференций. Получены 1 патент на изобретение и 3 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

8. Соответствие паспорту научной специальности

Диссертация выполнена в соответствии с паспортом научной специальности 2.6.17. Материаловедение:

п.15. Теоретические и экспериментальные исследования фундаментальных связей состава и структуры материалов с комплексом физико-механических и эксплуатационных свойств с целью обеспечения надежности и долговечности деталей, изделий, машин и конструкций;

п.16. Разработка физико-химических и физико-механических процессов формирования новых материалов, обладающих уникальными функциональными, физико-механическими, эксплуатационными и технологическими свойствами;

п.25. Разработка функциональных покрытий различного назначения и методов управления их свойствами и качеством.

9. Соответствие содержания автореферата основным идеям и выводам диссертации

Автореферат адекватно и полно отражает основное содержание диссертационной работы, её основные идеи, выводы и положения, выносимые на защиту.

10. Замечания и критический анализ содержания работы:

1. В главе 4.2 для жаропрочного никелевого сплава марки Inconel 625 приведена только качественная оценка микроструктуры, но нет количественного анализа размеров дендритов (в отличие от аустенитного нержавеющей сплава марки EuTroLoy 16316D.04). Это делает сравнение неполным.
2. Не проведена калибровка эффективности передачи ультразвуковых колебаний от излучателя к подложке. Несмотря на то, что в п. 2.2.1 указано, что эффективность передачи ультразвукового воздействия обеспечивается за счет болтовых соединений, нет экспериментальных измерений амплитуды колебаний на поверхности пластины. Без этого невозможно гарантировать, что ультразвуковые колебания одинаково передаются во всех опытах.
3. В работе не использованы методы неразрушающего контроля для оценки внутренней дефектности образцов, полученных с ультразвуковым воздействием и без. Пористость является одним из критически важных показателей качества изделий, полученных аддитивным методом.
4. Каким образом определялась оптимальная величина перекрытия валиков (0,4 мм по X и Y)? Проводилась ли оптимизация этого параметра для случая с ультразвуковым воздействием и без, или значение было фиксировано?
5. При синтезе функционально-градиентного материала использовались смеси металлических порошков из аустенитного нержавеющей сплава и никелевого жаропрочного сплава. Почему шаг варьирования химического состава был выбран: 25%. Не планировалось ли исследовать более плавный градиент (например, 10% шаг) для лучшего сглаживания свойств?
6. При синтезе функционально-градиентного материала не контролировалась степень перемешивания, энергодисперсионный метод анализа проведен вдоль центральной оси образцов, но нет картирования по всей площади поперечного сечения образцов, чтобы оценить однородность распределения элементов в пределах одного слоя.

Указанные замечания носят частный характер, не снижают общей положительной характеристики работы, её научной и практической ценности, достоверности её положений и выводов, а также научной новизны.

11. Заключение

На основании изложенного считаю, что диссертационная работа **Шварца Ивана Валерьевича** является завершённым квалификационным исследованием, выполненным на высоком научном и методическом уровне. Автореферат полно отражает содержание диссертации. Полученные результаты обладают значительной научной новизной и практической ценностью. **Шварц Иван Валерьевич** заслуживает присуждение ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17. Материаловедение.

Диссертационная работа Шварца Ивана Валерьевича «Структура и свойства материалов на основе нержавеющей сталей и никелевого сплава, получаемых лазерно-аддитивным методом с ультразвуковым воздействием» полностью соответствует требованиям п.9. «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемых к кандидатским диссертациям (Постановление Правительства РФ №842 от 24.09.2014).

Я, Тарасова Татьяна Васильевна, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

«14» мая 2026 г.

/Тарасова Татьяна Васильевна

Тарасова Татьяна Васильевна, кандидат технических наук, специальность 05.02.01 Материаловедение (в машиностроении), доцент, кафедра «Высокоэффективные технологии обработки», федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», 127055, г. Москва, Вадковский пер., д.3а., тел.: +7 (916) 096 86 54, e-mail: tarasova952@mail.ru



Подпись руки Курмачевой М.Р. удостоверяю
Директор ФГАОУ ВО «МГУ «СТАНКИН»
Курмачева Мария Р.
Курмачева М.Р.

Зход. № 05-8932
«21» 05 2026 г.
подпись М.Р.