

*На правах рукописи*



**ШВАРЦ ИВАН ВАЛЕРЬЕВИЧ**

**СТРУКТУРА И СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ  
НА ОСНОВЕ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ И НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА,  
ПОЛУЧАЕМЫХ ЛАЗЕРНО-АДДИТИВНЫМ МЕТОДОМ  
С УЛЬТРАЗВУКОВЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ**

2.6.17. Материаловедение

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Казань – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ»

**Научный руководитель:** **Гильмутдинов Альберт Харисович**, доктор физико-математических наук, профессор

**Официальные оппоненты:** **Коберник Николай Владимирович**, доктор технических наук, доцент, директор, федеральное государственное автономное учреждение «Научно-учебный центр «Сварка и контроль» при МГТУ им. Н. Э. Баумана»;

**Тарасова Татьяна Васильевна**, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», доцент кафедры «Высокоэффективные технологии обработки».

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится «11» июня 2026 года в 14<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета 24.2.312.12, созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», по адресу: 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, 68, Зал заседаний Ученого совета (А-330).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» и на сайте: <https://www.kstu.ru/servlet/contentblob?id=583995>

Отзывы на автореферат и диссертацию в двух экземплярах с подписями, заверенными печатью, просим направлять по адресу: 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, 68, ФГБОУ ВО «КНИТУ», ученому секретарю диссертационного совета 24.2.312.12. В отзыве указываются фамилия, имя, отчество (полностью), ученая степень с указанием специальности, ученое звание, наименование организации и должность лица, представившего отзыв, с указанием структурного подразделения, почтовый адрес, телефон и адрес электронной почты (при наличии) (п. 28 Положения о присуждении ученых степеней).

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
д.т.н., доцент



Тихонова Наталья Васильевна

## I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Одной из основных задач любой технологии производства является получение изделий или их компонентов с заданными свойствами и минимальным количеством дефектов. Технология изготовления, разработанная согласно всем требованиям и условиям эксплуатации, определяет скорость и качество производства, эффективность и эксплуатационную надежность изделий для конкретной отрасли промышленности. С появлением и стремительным развитием области лазерных и аддитивных технологий происходит переосмысление традиционных технологических процессов изготовления ответственных изделий в пользу их лазерного и аддитивного производства. Несмотря на неоспоримые преимущества лазерных и аддитивных способов производства – высокая производительность, высокая скорость обработки, возможность создания сложно-профильных изделий, применение способов 3D-печати в качестве перспективных ремонтных технологий – существуют проблемы при производстве изделий, связанные с повышенной пористостью, трещинообразованием, с формированием иррегулярной или неравномерной микроструктуры изделий с низким уровнем механических и эксплуатационных свойств.

В настоящее время одним из активно развивающихся и прогрессивных направлений исследований и разработок является введение дополнительной ультразвуковой энергии в традиционные процессы лазерной обработки сплавов, а также 3D-печати изделий из металлического мелкодисперсного порошка. Мультидисциплинарность и сложность этой технологии заключается в разрешении вопросов разработки конструкции ультразвукового излучателя, подбора оптимальной схемы подвода ультразвуковой волны, определения эффективной частоты и мощности ультразвуковой вибрации, анализа влияния ультразвуковых колебаний (УЗК) на особенности формирования ванны расплава, микроструктуры, дефектов, а также механических и эксплуатационных свойств.

Разнообразие способов ввода ультразвуковой вибрации в различные технологические процессы как при получении традиционных материалов, так и при синтезе новых и функционально-градиентных материалов, предопределило дополнительные усилия к детальному изучению особенностей формирования микроструктуры и свойств изделий из широкой номенклатуры материалов. Следовательно, тема диссертационного исследования, связанная с исследованием влияния ультразвукового воздействия на микроструктуру сплавов в процессе лазерно-аддитивного производства, а также установление связи микроструктурных изменений с изменениями в механических и эксплуатационных свойствах, является актуальной.

Актуальность выбранной темы исследования подтверждается ее выполнением в рамках Государственного задания №075-03-2021-126, хоздоговора №774/850-Д с РФЯЦ-ВНИИЭФ «Исследование и разработка концепции прецизионной головки для лазерной порошковой наплавки с применением акустического метода массопереноса», гранта Российского научного фонда (проект №23-29-00219) по теме «Разработка научно-технологических основ создания новых функционально-градиентных

материалов на основе принципов управления структурой сплавов в процессе лазерно-акустического аддитивного производства»

**Степень разработанности темы.** Развитие области лазерных и аддитивных технологий неотъемлемо связано с научно-практическими результатами отечественных и зарубежных работ большого числа ученых. Среди них значительный вклад в изучение особенностей формирования микроструктуры и физико-механических свойств различных металлов и сплавов в лазерных процессах сварки, наплавки, поверхностного упрочнения, полировки и т.д., в том числе с приложением ультразвуковых колебаний, внесли такие ученые как Э.М. Пархимович, А.Г. Григорянц, Г.А. Туричин, А.А. Попович, Е.А. Колубаев, С.С. Волков, И.Н. Шиганов, А.А. Карабутов, А.Х. Гильмутдинов, А.И. Горунов, И.В. Шишковский, Е.Н. Каблов, U.E. Reisgen, M.A. Schmidt, T. Debroy, L. Huachen, L. Guan, C. Lampra, A. Yaghi и др. Однако вопрос создания оптимальной комбинированной технологии лазерной обработки и 3D-печати изделий с ультразвуковым воздействием, а также разработки эффективной методики последующего качественного и количественного анализа микроструктуры и свойств изделий остается важным и востребованным.

**Научная задача,** решаемая в диссертации, заключается в разработке экспериментального оборудования для апробации методов лазерно-аддитивного производства с дополнительным ультразвуковым воздействием для выявления особенностей формирования микроструктуры различных сплавов и установления их связи с физико-механическими и эксплуатационными свойствами. Решение данной задачи имеет научно-практическую значимость не только в возможности управления микроструктурой и свойствами материалов в процессе лазерной обработки, но и в получении или синтезе принципиально новых покрытий, сварных соединений и изделий с уникальными физико-механическими свойствами.

**Объект исследования:** аустенитные нержавеющие сплавы марки AISI 316L (08X17H13M2) и EuTroLoy 16316D.04, жаропрочный никелевый сплав марки Inconel 625 (ХН75МБТЮ).

**Предмет исследования:** микроструктура, механические и трибологические свойства сплавов.

**Цель диссертационной работы:** повышение микротвердости, прочности и износостойкости сплавов за счет управления микроструктурой с помощью ультразвукового воздействия в процессе лазерной точечной обработки (ЛТО) и прямого лазерного выращивания (ПЛВ).

**Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:**

1) разработать экспериментальное оборудование для апробации и исследования методов ЛТО и ПЛВ с ультразвуковым воздействием с учетом конструктивных особенностей ультразвуковых излучателей Ланжевена с выходной мощностью генератора 100 Вт, рабочей частотой 22 кГц и 40 кГц соответственно;

2) разработать методику исследования геометрических параметров ванны расплава и микроструктуры, а также определить микротвердость нержавеющей

сплава марки AISI316L для оценки степени влияния ультразвукового воздействия частотой 40 кГц и мощностью 100 Вт в процессе ЛТО;

3) разработать методику исследования микроструктуры, а также определить механические и трибологические свойства нержавеющей сплава марки EuTroLoy 16316D.04 для оценки степени влияния ультразвукового воздействия частотой 22 кГц и мощностью 100 Вт в процессе ПЛВ;

4) установить влияние ультразвукового воздействия частотой 22 кГц и мощностью 100 Вт на особенности формирования микроструктуры и микротвердости сплава Inconel 625 в процессе ПЛВ;

5) установить влияние ультразвукового воздействия частотой 22 кГц и мощностью 100 Вт на особенности формирования микроструктуры, микротвердости и химического состава функционально-градиентного образца на основе нержавеющей и никелевого сплава в процессе ПЛВ.

### **Научная новизна.**

1. Установлено, что ультразвуковое воздействие частотой 40 кГц и мощностью 100 Вт в процессе ЛТО нержавеющей сплава 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 сплава 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 изменения 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.

**Теоретическая значимость диссертационного исследования.** Выявлена зависимость фазового состава микроструктуры, размеров ванны расплава и микротвердости образцов из нержавеющей сплава марки AISI 316L в процессе ЛТО от ультразвукового воздействия частотой 40 кГц и мощностью 100 Вт. Показана зависимость среднеквадратического отклонения размеров столбчатых дендритов микроструктуры нержавеющей сплава марки EuTroLoy 16316D.04, а также механических свойств (микротвердость, прочность при статическом растяжении, износостойкость) в процессе ПЛВ от ультразвукового воздействия частотой 22 кГц мощностью 100 Вт. Установлена зависимость микротвердости и химического состава функционально-градиентного материала на основе нержавеющей сплава марки EuTroLoy 16316D.04 и никелевого сплава марки Inconel 625 в процессе ПЛВ от ультразвукового воздействия частотой 22 кГц и мощностью 100 Вт в процессе ПЛВ. В работе показана теоретическая возможность управления структурой различных сплавов и их физико-механическими свойствами в процессе лазерного и аддитивного производства за счет ультразвукового воздействия различной частоты.

**Практическая значимость диссертационного исследования.** Разработаны методики (программные коды) для исследования геометрических параметров ванны расплава (площадь поперечного сечения, площадь поверхности), фазового состава (процентное содержание аустенита,  $\delta$ -феррита) в процессе ЛТО, а также размеров оси 1-го порядка дендритных кристаллов (средний размер, среднеквадратическое отклонение) в процессе ПЛВ нержавеющей сплавов на языке MATLAB, отличающиеся автоматизацией процесса измерений на основе оптических снимков. Эффективное управление механизмами структуро- и формообразования ванны расплава в лазерных и аддитивных технологиях за счет дополнительного ультразвукового воздействия различной частоты и мощности позволяет сформировать изделия и покрытия не только с мелкозернистой структурой, но и с улучшенными физико-механическими свойствами.

**Методология и методы диссертационного исследования.** Для решения поставленных задач диссертационного исследования особенностей формирования микроструктуры и свойств сплавов в условиях высокотемпературной обработки (лазерное излучение) сплавов с приложением ультразвукового воздействия были использованы оптические методы исследования, метод энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии, метод лазерной дифракции, методы определения прочности и пластичности при статическом растяжении, метод определения микротвердости, метод определения износостойкости, методы вибропросеивания и смешивания металлических порошковых композиций, методы статистического анализа, методы функционального программирования. Количественный анализ результатов, определение расчетных

характеристик, построение графиков и гистограмм осуществлялись при помощи программных сред MS Excel и MATLAB.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты исследования геометрических параметров ванны расплава, фазового состава микроструктуры и механических свойств нержавеющей стали AISI 316L в результате экспериментальной апробации метода ЛТО с ультразвуковым воздействием частотой 22 кГц и мощностью 100 Вт.

2. Результаты исследования микроструктуры нержавеющей сплава EuTroLoy 16316D.04 с количественной оценкой размеров и распределения столбчатых дендритов, а также механических и трибологических свойств в результате экспериментальной апробации метода ПЛВ с ультразвуковым воздействием частотой 22 кГц и мощностью 100 Вт.

3. Результаты исследования микроструктуры и микротвердости жаропрочного никелевого сплава Inconel 625, а также анализ микроструктуры слоев, микротвердости и распределения химических элементов в функциональном градиентном материале, полученных методом ПЛВ с ультразвуковым воздействием частотой 22 кГц и мощностью 100 Вт.

**Достоверность полученных результатов.** Достоверность результатов, полученных в диссертационной работе, обеспечивается за счет использования современных методов и методик исследований, сертифицированного и поверенного научно-исследовательского оборудования, включающего оптические микроскопы (Carl Zeiss Axio Observer.A1m, Stemi 2000-C), сканирующий электронный микроскоп с энергодисперсионным спектрометром (Auriga CrossBeam), микротвердомер (TUKON-2500), лазерный дифракционный анализатор (Mastersizer 3000), электромеханическую испытательную машину (Instron 5854), просеивающую машину (HAVER EML 315 digital plus), встряхивающий смеситель (TURBULA T2F). Статистическая обработка результатов экспериментов осуществлялась с помощью специализированного программного обеспечения. Результаты работы согласуются с теоретико-экспериментальными данными других научных работ.

**Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях:**

- международная молодежная научная конференция «XXVI Туполевские чтения (школа молодых ученых)» (Казань, 2023);
- XXI Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Высокие технологии в машиностроении» (Самара, 2024);
- 23-я Международная конференция «Авиация и космонавтика» (Москва, 2024);
- XI Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии – ЛаПлаз-2025» (Москва, 2025);
- международная научно-техническая конференция «СМИС-2025. Технологии управления качеством» (Москва, 2025);

**Реализация результатов работы:**

- внедрены 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»;

- внедрены в ФГУП «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики».

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности.** В диссертации разработано экспериментальное оборудование для получения материалов с новыми свойствами за счет ультразвукового воздействия на процесс кристаллизации жидкой ванны расплава в процессе лазерно-аддитивного производства. Разработаны и предложены методики исследования микроструктуры сплавов, позволяющие количественно оценить фазовый состав микроструктуры и размер столбчатых дендритов аустенитных нержавеющей сплавов в процессе ЛТО и ПЛВ соответственно. Установлена связь микроструктурных изменений с комплексом механических и трибологических характеристик исследуемых сплавов.

Результаты диссертационного исследования соответствуют следующим пунктам паспорта научной специальности 2.6.17. Материаловедение:

*П15. 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;*

*П16. Разработка физико-химических и физико-механических процессов формирования новых материалов, обладающих уникальными функциональными, физико-механическими, эксплуатационными и технологическими свойствами;*

*П25. Разработка функциональных покрытий различного назначения и методов управления их свойствами и качеством.*

**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.

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

**Сведения о личном вкладе автора.** Автор определил цель и задачи исследования, самостоятельно выполнил эксперименты по лазерной обработке и наплавке, провел пробоподготовку образцов, осуществил оптические исследования микроструктуры, механические и трибологические испытания, а также обработал и проанализировал полученные результаты с помощью оригинальных программ, написанных на языке MATLAB. Результаты диссертационной работы стали основой для подготовки научных докладов, публикаций, патента и программ ЭВМ под руководством доктора физико-математических наук, профессора, академика АН РТ Гильмутдинова Альберта Харисовича.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены цель и задачи исследования, сформулированы теоретическая и практическая значимости работы, описаны ключевые методы исследования, представлены основные результаты и положения, выносимые на защиту.

В **главе 1** рассмотрены основные технологии лазерного традиционного и аддитивного производства. Показано, что перспективным направлением развития машиностроительной отрасли в настоящее время является внедрение аддитивных технологий, направленных на изменение классических подходов к проектированию и изготовлению конструкций с учетом возможностей метода послойного синтеза. Отмечается, что существуют дефекты, на порядок ухудшающие физико-механические характеристики изделий, несмотря на ряд преимуществ лазерных и аддитивных технологий. В связи с этим приведены наиболее распространенные дефекты лазерно-аддитивного производства, разделенные на три группы: 1) внутренние и поверхностные дефекты изделий; 2) иррегулярная и неоднородная микроструктуры; 3) остаточные напряжения и деформации. Для каждой рассматриваемой группы дефектов рассмотрены причины их образования. Для определения эффективных методов борьбы с указанными дефектами лазерно-аддитивного производства приведен обзор перспективных направлений научно-исследовательских работ. Выделены пять основных направлений: оптимизация параметров лазерной обработки; применение функционально-градиентных и композиционных материалов; использование различных методов термообработки и дополнительных электромагнитного и ультразвукового воздействий. Наиболее сильный акцент литературного обзора сделан на научных изысканиях по созданию комбинированных технологий лазерной сварки и ПЛВ с дополнительным ультразвуковым воздействием. Преимущество этих подходов перед другими технологическими процессами обусловлено комплексным воздействием, заключающимся не только в возможности эффективного управления структурообразованием в процессе обработки, но также в снижении количества дефектов и повышении физико-механических характеристик формируемых покрытий, сварных соединений и изделий.

В данной работе предлагается рассмотреть два отдельных, но взаимосвязанных технологических процесса, основой которых служит источник теплового воздействия в виде лазерного излучения. Во-первых, это исследование процесса ЛТО с дополнительным ультразвуковым воздействием с целью изучения влияния ультразвуковых вибраций на микроструктуру поверхностного слоя, распределения микротвердости, а также на геометрию ванны расплава, при этом, использование какого-либо присадочного материала исключается. Во-вторых, это исследование процесса ПЛВ с дополнительным ультразвуковым воздействием с целью изучения влияния ультразвуковых вибраций на микроструктуру, распределение химических элементов, а также механические и трибологические характеристики формируемых слоев. В данном случае в качестве присадочного материала используется мелкодисперсный металлический порошок.

В главе 2 приведены основные характеристики используемых материалов, перечень основного и вспомогательного оборудования для проведения экспериментов и последующего анализа металлических образцов, ключевые параметры процессов ЛТО и ПЛВ, а также описание разработанных методик исследований микроструктуры и поверхности образцов. На рис. 1 представлено разработанное экспериментальное оборудование для апробации методов ЛТО и ПЛВ с ультразвуковым воздействием, учитывающее особенности используемых ультразвуковых излучателей Ланжевена мощностью 100 Вт, частотой 22 и 40 кГц соответственно. Для изготовления оснований и системы охлаждения использовалось оборудование для 3D-печати (Flash Forge Adventure 5M), работающее по принципу послойного наплавления (Fused Deposition modelling – FDM). Эффективность передачи ультразвуковых вибраций обеспечивается за счет точного сопряжения поверхностей и прижатия пластин к ультразвуковому излучателю Ланжевена.

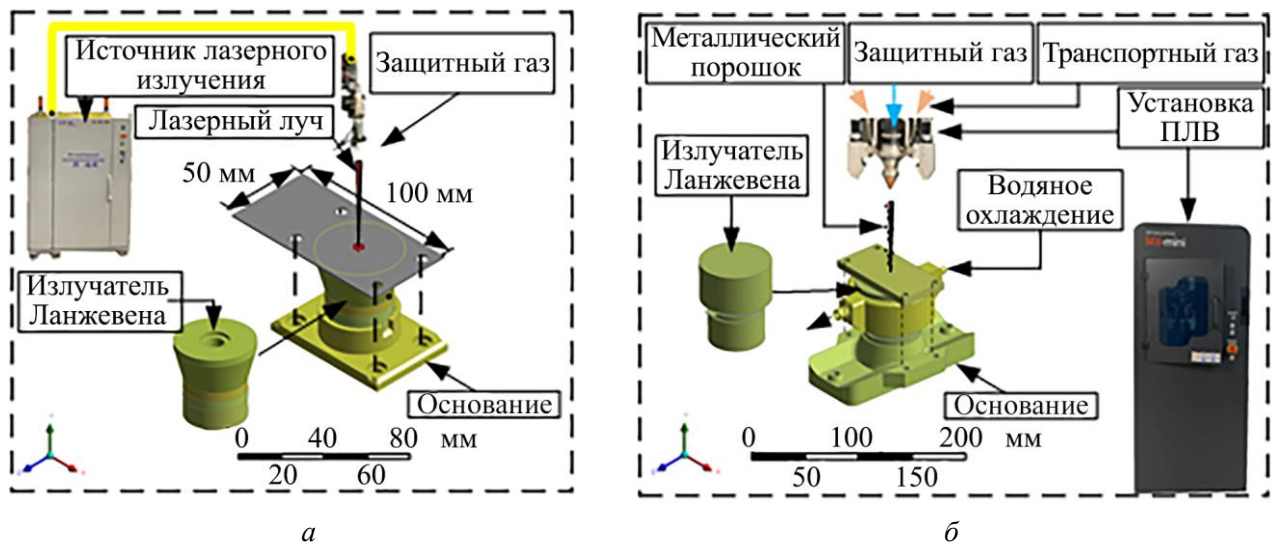


Рисунок 1 – Экспериментальные стенды:  
а и б – схемы ЛТО и ПЛВ с ультразвуковым воздействием соответственно

Для количественной оценки степени воздействия ультразвуковых вибраций на геометрию ванны расплава в процессе ЛТО разработана методика исследования ее поверхности. Реализован алгоритм полуавтоматического измерения площади поверхности (ПП) (рис. 2, а) и площади поперечного сечения (ППС) (рис. 2, б) ванны расплава на основе оптических снимков. Для определения границы фазового перехода материала и подсчета количества пикселей в данной области используется концепция «область интереса», позволяющая в ручном режиме ограничить область программного поиска границ ванны расплава, так как общая картина не позволяет в автоматическом режиме выделить «маску». Пример определения границы ванны расплава с помощью разработанного алгоритма представлен на рис. 2.

Для количественной оценки степени воздействия ультразвуковых вибраций на микроструктуру в процессе ЛТО разработана методика определения процентного соотношения фазовых составляющих микроструктуры на основе оптических снимков. Пример работы программы представлен на рис. 3, на котором отмечены зоны

основного металла (ОМ) и сплавления (ЗС). Измерения проводились для девяти различных зон, отмеченных арабскими цифрами.

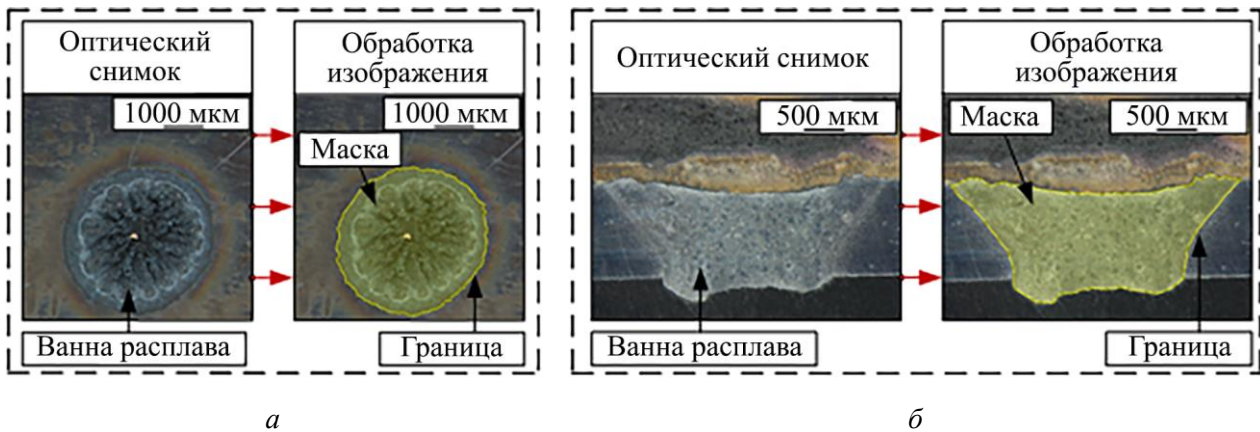


Рисунок 2 – Определение границы ванны расплава и наложение расчетной маски:  
*а* – ПШ расплава; *б* – ПШС расплава

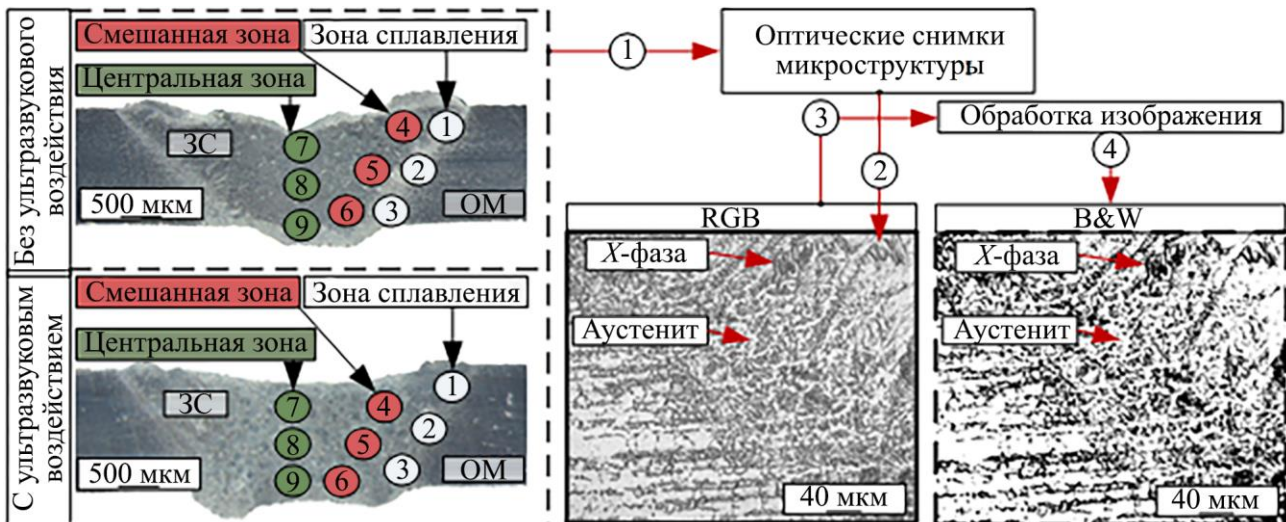


Рисунок 3 – Алгоритм определения фазовых составляющих

В данной работе принято решение разделить микроструктуру аустенитной нержавеющей стали на две составляющие: аустенит и X-фаза, где X включает в себя феррит, а также различные карбиды и другие возможные фазы. Для разграничения указанных структурных составляющих разработанный алгоритм позволяет переводить оптические цветные (RGB) снимки в черно-белые (Black & White – B&W), а после программа подсчитывает общее количество пикселей и отдельное количество белых и черных пикселей для определения их процентного соотношения.

Для количественной оценки степени воздействия ультразвуковых вибраций на микроструктуру в процессе ПЛВ разработана методика определения диаметров оси 1-го порядка дендритных кристаллов или так называемых столбчатых дендритов. Алгоритм работы программы приведен на рис. 4.

Основой для алгоритма служит способ определения размера зерен с помощью метода секущих. Таким образом, входными данными являются растровые оптические

снимки микроструктуры, полученные для различных зон в поперечном сечении образцов, отмеченных арабскими цифрами. Алгоритм считывает и преобразует исходное изображение в бинарное, определяет размер одного пикселя на основе масштабной линейки, создает произвольное число линий, параллельных оси  $OX$  и  $OY$ , формирует вдоль каждой линии кусочно-линейную функцию со значением 1 в зоне дендритного кристалла и 0 – на их границе. На основе полученных значений формируется гистограмма распределения, а также функция нормального распределения с рассчитанными значениями математического ожидания и среднеквадратического отклонения.

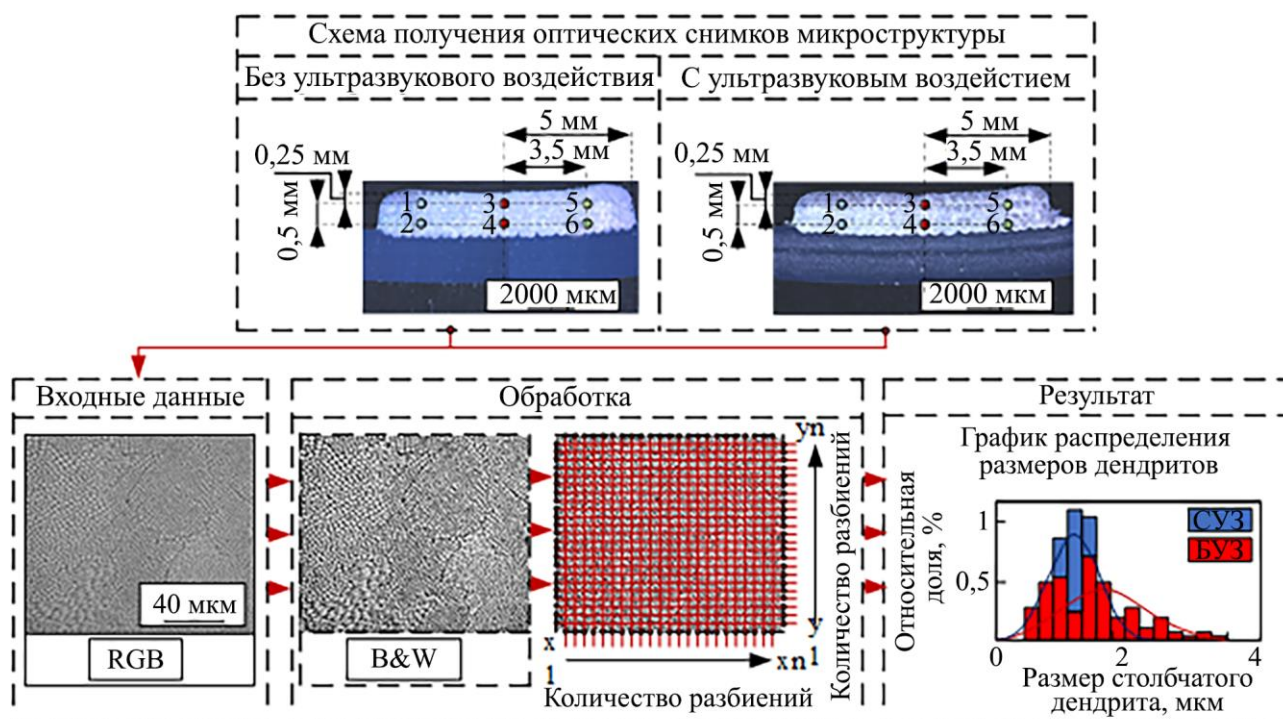


Рисунок 4 – Алгоритм работы программы определения распределения размеров столбчатых дендритов в произвольной области микроструктуры

Для проведения исследований использовалось оборудование разного назначения. Исходный фракционный состав металлических порошков был определен с помощью лазерного дифракционного анализатора Mastersizer 3000. Методом вибрационного просеивания на оборудовании HAVER EML 315 digital plus была отобрана фракция размером 60-90 мкм. Для формирования порошковых смесей использовалось оборудование TURBULA T2F. Резка пластин установленного размера осуществлялась на отрезном станке AbrasiMatic 300. Образцы для исследования микроструктуры, механических и трибологических характеристик были вырезаны с помощью электроэрозионного станка АРТА 450 ПРО. Поперечные шлифы для исследования микроструктуры и микротвердости подвергались запрессовке на оборудовании SIMPLIMET XPS1 с последующей шлифовкой поверхности на оборудовании BUEHLER ECOMET 300 PRO. Макро- и микроструктуры оценивались после электролитического травления с использованием подобранного реагента на оптических микроскопах Carl Zeiss Axio Observer.A1m и Stemi 2000-C. Элементный анализ образцов проводился с помощью оборудования Auriga CrossBeam, оснащенного

энергодисперсионным спектрометром (EDS). Микротвердость определялась на оборудовании Tukon 2500. Испытания на трение проводились на оборудовании Универсал-1А, испытания на прочность при статическом растяжении – на универсальной электромеханической испытательной машине Instron 5854.

В главе 3 приведены результаты исследований образцов из материала марки AISI 316L, полученных традиционным методом ЛТО, а также с дополнительным ультразвуковым воздействием частотой 40 кГц и мощностью 100 Вт. В качестве ключевых параметров исследования рассматривались геометрические характеристики ванны расплава и фазовый состав микроструктуры. На рис. 5 представлены результаты исследования влияния ультразвуковых колебаний (УЗК) на ПП и ППС ванны расплава согласно разработанной методике.

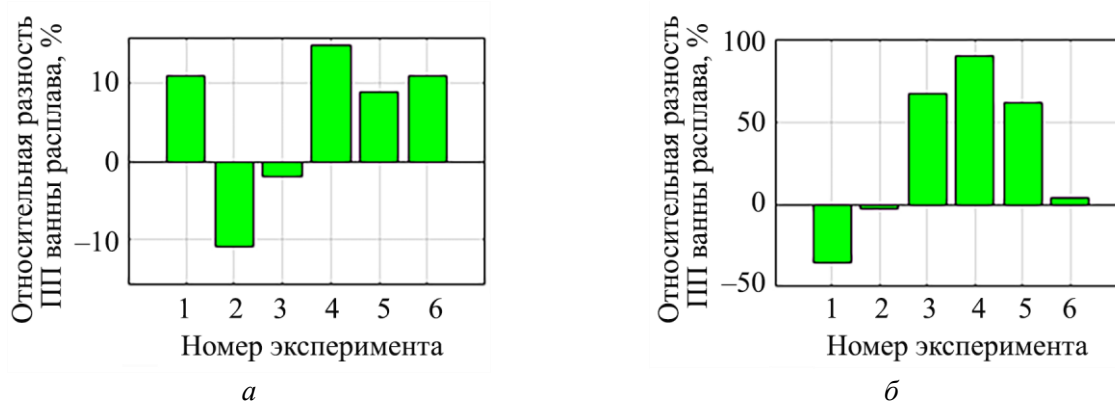


Рисунок 5 – Влияние УЗК на площадь поверхности ванны расплава:  
а и б – относительные разности ПП и ППС соответственно

Установлено, что при фиксированном значении диаметра лазерного пятна, варьировании времени воздействия и мощности лазера дополнительный ввод ультразвуковой вибрации изменяет форму поверхности ванны расплава. Дальнейший анализ поперечных сечений ванн расплава, приведенный на рис. 6, позволил выявить увеличение глубины проплавления.

Таким образом, можно предположить, что в результате воздействия ультразвуковых колебаний в ванне расплава возникают области знакопеременного давления, приводящие к изменению традиционной скорости и структуры течений в ванне расплава. Направление течений ввиду непостоянства коэффициента поверхностного натяжения и градиента температур, направленное от центра вниз, показано на рис. 6 красными стрелками. Соответственно при больших скоростях течений будет обеспечиваться большая глубина проплавления.

Микроструктура аустенитной нержавеющей стали, полученная как без ультразвукового, так и с ультразвуковым воздействием, представлена зернами аустенита с включениями  $\delta$ -феррита. При этом микроструктура, полученная традиционным методом ЛТО, представлена ярко выраженными столбчатыми дендритами, ориентированными в сторону градиента температур (рис.7, а). Однако микроструктура, полученная методом ЛТО с ультразвуковым воздействием, стремится к глобулярной форме (рис. 7, б).

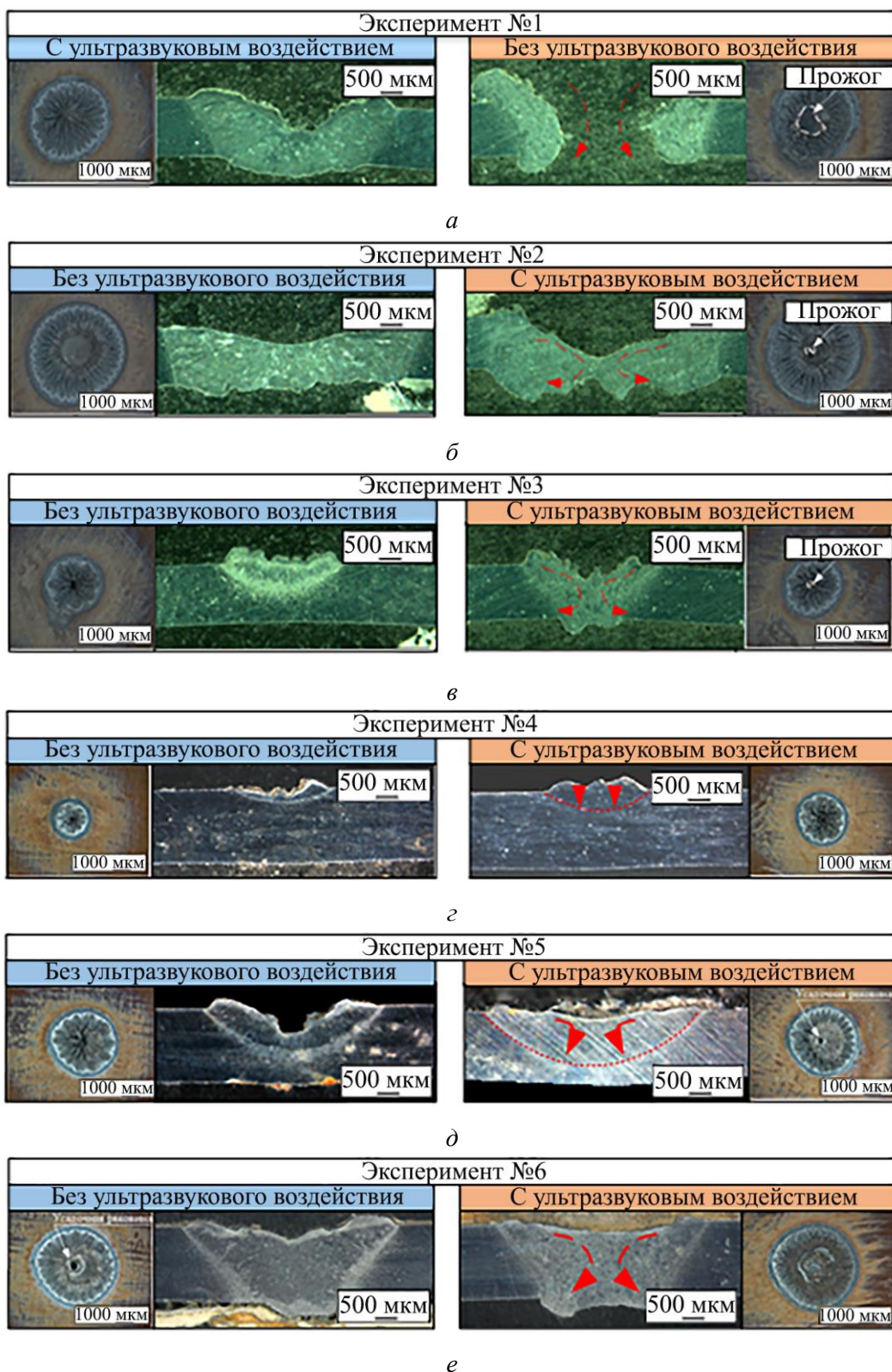


Рисунок 6 – Анализ поперечных сечений ванн расплава: *а* – мощность: 1250 Вт, время: 4.0 с; *б* – мощность: 1500 Вт, время: 3.5 с; *в* – мощность: 1000 Вт, время: 5.0 с; *г* – мощность: 1375 Вт, время: 4.5 с; *д* – мощность: 1625 Вт, время: 4.0 с; *е* – мощность: 1875 Вт, время: 3.5 с

Согласно разработанной методике был определен фазовый состав микроструктур и выполнен расчет значения  $X$ -фазы для каждой установленной зоны исследования (рис. 7, *в*), а также общее среднее значение  $X$ -фазы для зон сплавления (ЗС), смешанной (ЗСМ) и центральной (ЗЦ) (рис. 7, *з*).

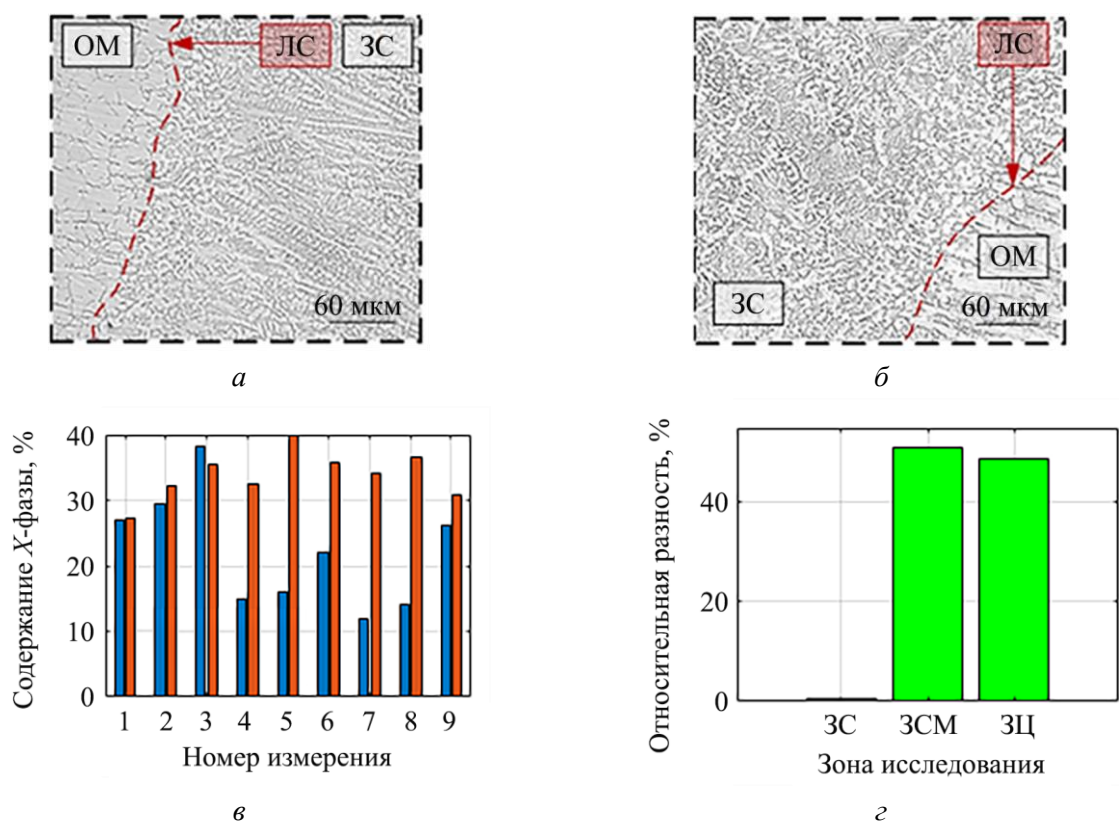


Рисунок 7 – Исследование микроструктуры AISI 316L: *а* – микроструктура, полученная методом ЛТО без УЗК; *б* – микроструктура, полученная методом ЛТО с УЗК; *в* – процентное содержание X-фазы; *г* – относительная разность результатов (■ – с УЗК; ■ – без УЗК)

Установлено, что среднее процентное содержание X-фазы ЗСП практически одинаково как в эксперименте с ультразвуковым воздействием, так и без, относительная разность при этом менее 1 %. Однако в центральной и смешанной частях ванны расплава, среднее процентное содержание X-фазы значительно больше в экспериментах, полученных с ультразвуковым воздействием, и относительная разность составляет величину от 48 до 52% соответственно. Таким образом, можно сделать вывод о том, что дополнительное ультразвуковое воздействие приводит к изменению условий кристаллизации, при которых среднее процентное содержание X-фазы, а вместе с ней и процентное содержание  $\delta$ -феррита становится больше. Благодаря этому, конечная микроструктура ванны расплава приобретает мелкозернистую и глобулярную формы структуры.

На рис. 8 приведены результаты исследования распределения микротвердости металлических образцов для экспериментов №2 (*а*, *б*) и №6 (*в*, *г*), полученных традиционным методом ЛТО, а также с дополнительным приложением ультразвукового воздействия.

Установлено, что в связи с микроструктурными изменениями (форма дендритных кристаллов, количества  $\delta$ -феррита) в ванне расплава происходит улучшение ее механических свойств, а именно повышение значений микротвердости и что относительная разность между максимальными значениями микротвердости в ванне расплава, полученной с и без ультразвуковых вибраций, для экспериментов №2 и 6 составляет 14,9 и 12,1% соответственно.

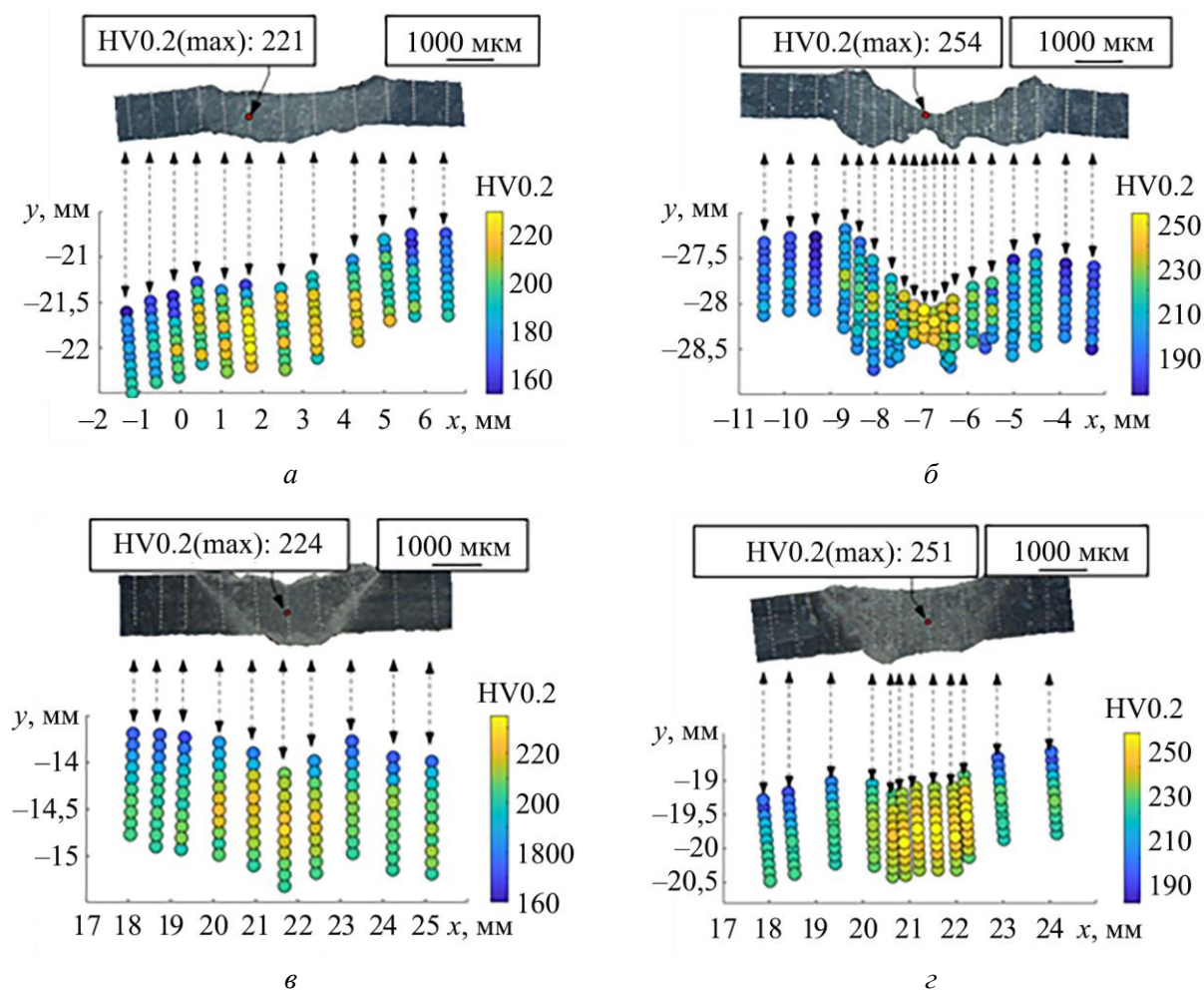


Рисунок 8 – Исследование микротвердости: *а* – эксперимент №2 без УЗК; *б* – эксперимент №2 с УЗК; *в* – эксперимент №6 без УЗК; *г* – эксперимент №6 без УЗК

В главе 4 приведены результаты исследований микроструктуры и физико-механических свойств сплавов EuTroLoy 16316D.04 и Inconel 625 и созданного на их основе функционально-градиентного материала, полученного методом ПЛВ с приложением ультразвукового воздействия частотой 22 кГц и мощностью 100 Вт, а также традиционным методом ПЛВ.

На рис. 9 представлены гистограммы распределения размеров столбчатых дендритов для образцов из EuTroLoy 16316D.04, полученные согласно разработанной методике, представленной на рис. 4.

В табл. 1 приведены значения характеристик полученных кривых распределения. Установлено, что относительная разность среднеквадратических отклонений размеров столбчатых дендритов при сравнении двух технологий составляет величину от 38,8 до 65,1%. При этом абсолютное значение среднеквадратического отклонения для традиционного метода ПЛВ около 1, что говорит о значительном разбросе размеров столбчатых дендритов и неравномерности полученной микроструктуры, в то время как для метода ПЛВ с ультразвуковым воздействием значения размеров столбчатых дендритов в большей степени сгруппированы вокруг среднего значения, что говорит о более равномерно распределенной микроструктуре металла.

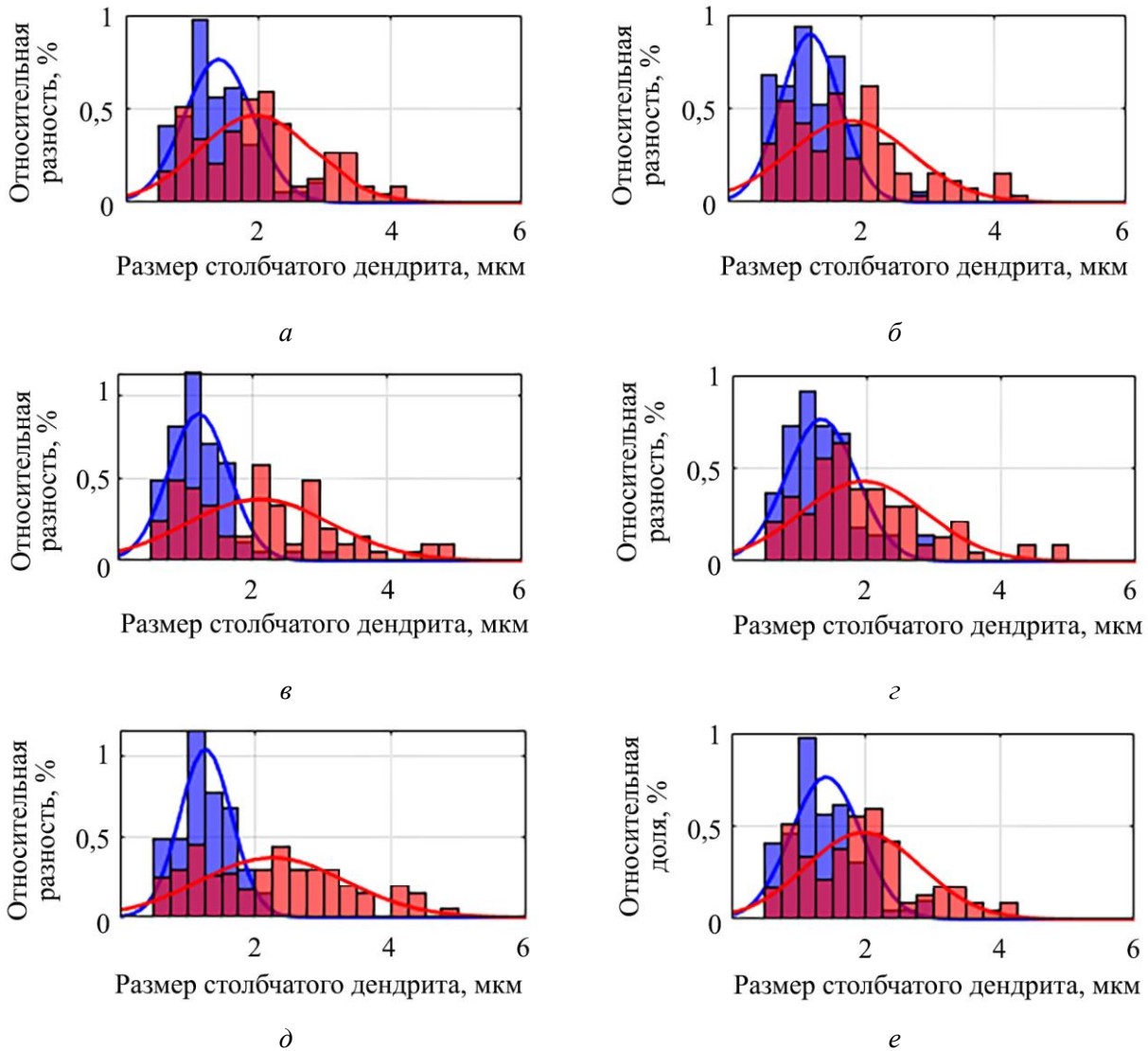


Рисунок 9 – Гистограммы распределения размеров столбчатых дендритов:  
*a* – зона 1; *б* – зона 2; *в* – зона 3; *г* – зона 4; *д* – зона 5; *е* – зона 6  
 (■ – с УЗК; — с УЗК; ■ – без УЗК; — без УЗК)

Таблица 1 – Значения характеристик кривых распределения

№ п/п	Ультразвуковое воздействие	Среднеквадратичное отклонение размеров дендритов, мкм	Относительная разность, %
1	Нет	0,85	38,82
	Да	0,52	
2	Нет	0,92	52,17
	Да	0,44	
3	Нет	1,07	57,94
	Да	0,45	
4	Нет	0,93	44,09
	Да	0,52	
5	Нет	1,09	65,14
	Да	0,38	
6	Нет	0,86	50,00
	Да	0,43	

На рис. 10 приведен качественный и количественный анализы (анализ среднего размера столбчатого дендрита) микроструктуры образцов из сплава EuTroLoy 16316D.04, полученных традиционным методом ПЛВ и с дополнительным ультразвуковым воздействием.

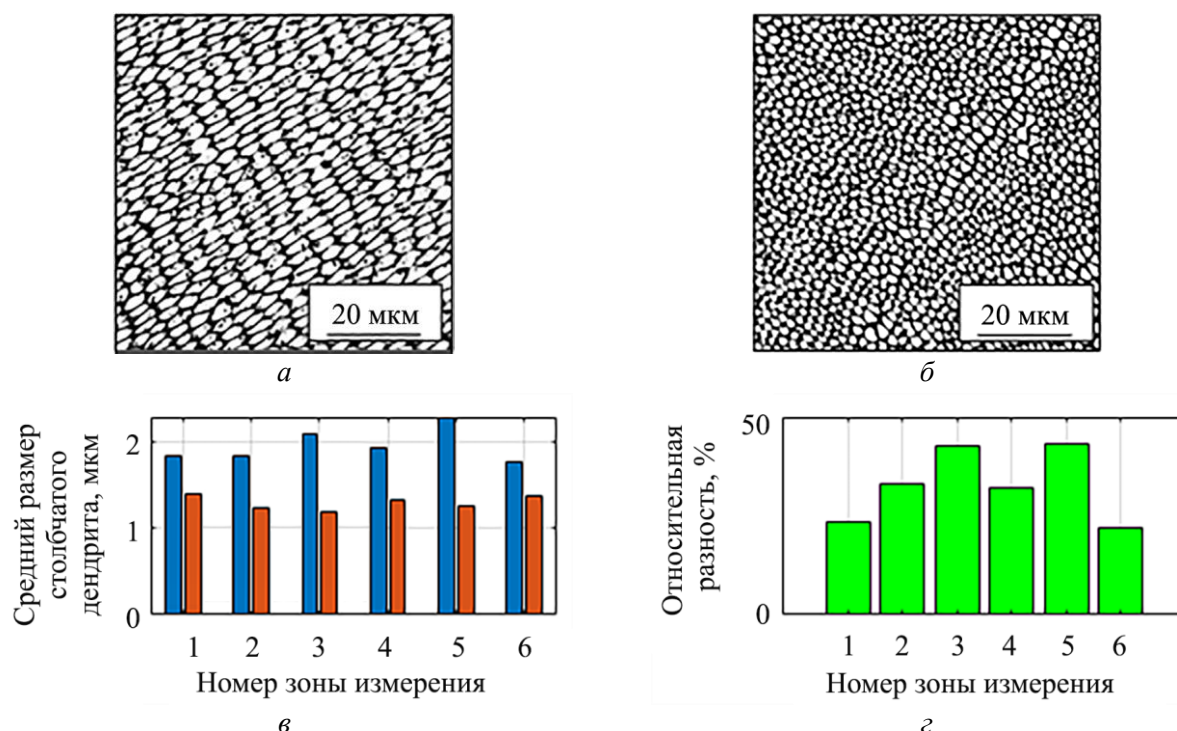


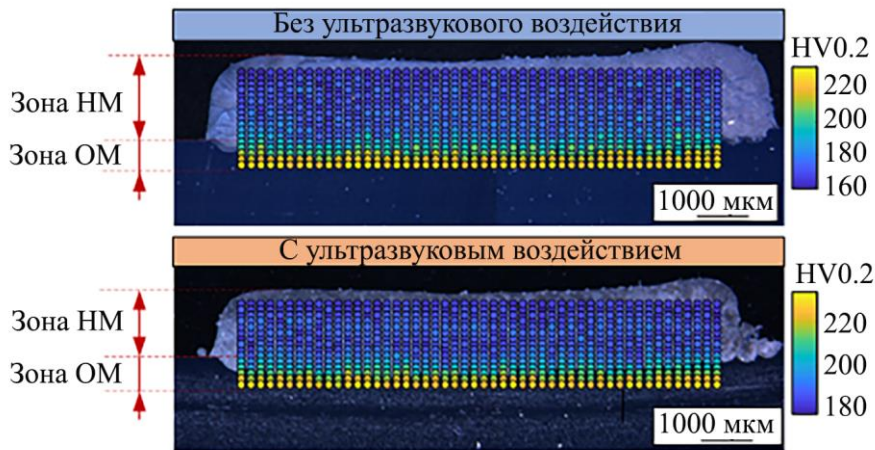
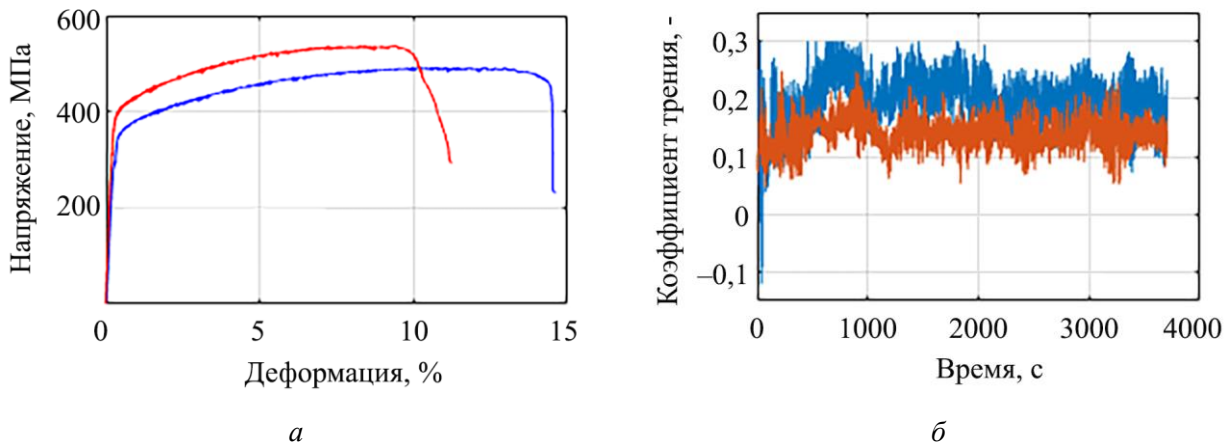
Рисунок 10 – Исследование микроструктуры EuTroLoy 16316D.04: *а* – микроструктура, полученная методом ПЛВ без УЗК; *б* – микроструктура, полученная методом ПЛВ с УЗК; *в* – средний размер столбчатого дендрита; *з* – относительная разность результатов (■ – с УЗК; ■ – без УЗК)

Установлено, что преобладающей формой дендритов для образцов, полученных методом ПЛВ без ультразвукового воздействия, является вытянутая столбчатая форма (рис. 10, *а*). Однако в образцах, полученных методом ПЛВ с ультразвукового воздействия, преобладает ячеистая равноосная форма дендритов (рис. 10, *б*). При этом, количественно был определен средний размер дендрита (рис. 10, *в*) и установлено, что относительная разность между значениями среднего размера столбчатого дендрита для разных зон образцов составила от 22 до 43% (рис. 10, *з*).

На рис. 11 приведены результаты исследований образцов из сплава EuTroLoy 16316D.04 на прочность при статическом растяжении, износостойкость, а также показано распределение значений микротвердости в зоне основного (ОМ) и наплавленного металла (НМ).

В ходе трибологических испытаний (рис. 11, *а*) было выявлено, что в течение первых 500 секунд коэффициент трения для обоих образцов практически одинаковый, однако впоследствии он возрастает предположительно из-за повышения температуры в точке контакта стального шарика с поверхностью образцов. Начиная с 500-й секунды, неровность поверхности достигает устойчивого состояния, что приводит к стабилизации значения коэффициента трения. При этом, среднее значение коэффициента трения для образца с ультразвуковым воздействием – 0,19, а для

образца, полученного без ультразвукового воздействия, – 0,14. Таким образом, в результате ультразвуковой вибрации в процессе ПЛВ удалось повысить износостойкость образца на 26,3%.



в

Рисунок 11 – Исследование физико-механических свойств сплава EuTroLoy 16316D.04:  
*а* – испытания на прочность при статическом растяжении; *б* – трибологические испытания;  
*в* – анализ микротвердости (— — без УЗК; — — с УЗК)

Во время испытаний на прочность при статическом растяжении металлических образцов (рис. 11, *б*) было установлено, что ультразвуковое воздействие приводит к увеличению прочности. Среднее значение прочности образцов в результате ультразвукового воздействия возрастает на 10,2%, а среднее значение относительной деформации образцов уменьшается на 3%.

В результате анализа микротвердости (рис. 11, *в*) было установлено, что зона ОМ, полученная с ультразвуковым воздействием, не претерпела существенных изменений, при этом абсолютная и относительная разности между экспериментами составляет 1,7 HV0.2 и 0,8% соответственно. Однако микротвердость зоны НМ, полученную с ультразвуковым воздействием, удалось увеличить по сравнению с экспериментом без ультразвукового воздействия. Абсолютная и относительная разности результатов составляют 22,1 HV0.2 и 12,7% соответственно.

На рис. 12 приведены качественное исследование микроструктуры (*а, б*) и анализ микротвердости (*в, г*) образцов из материала Inconel 625, полученных традиционным методом ПЛВ и с дополнительным ультразвуковым воздействием.

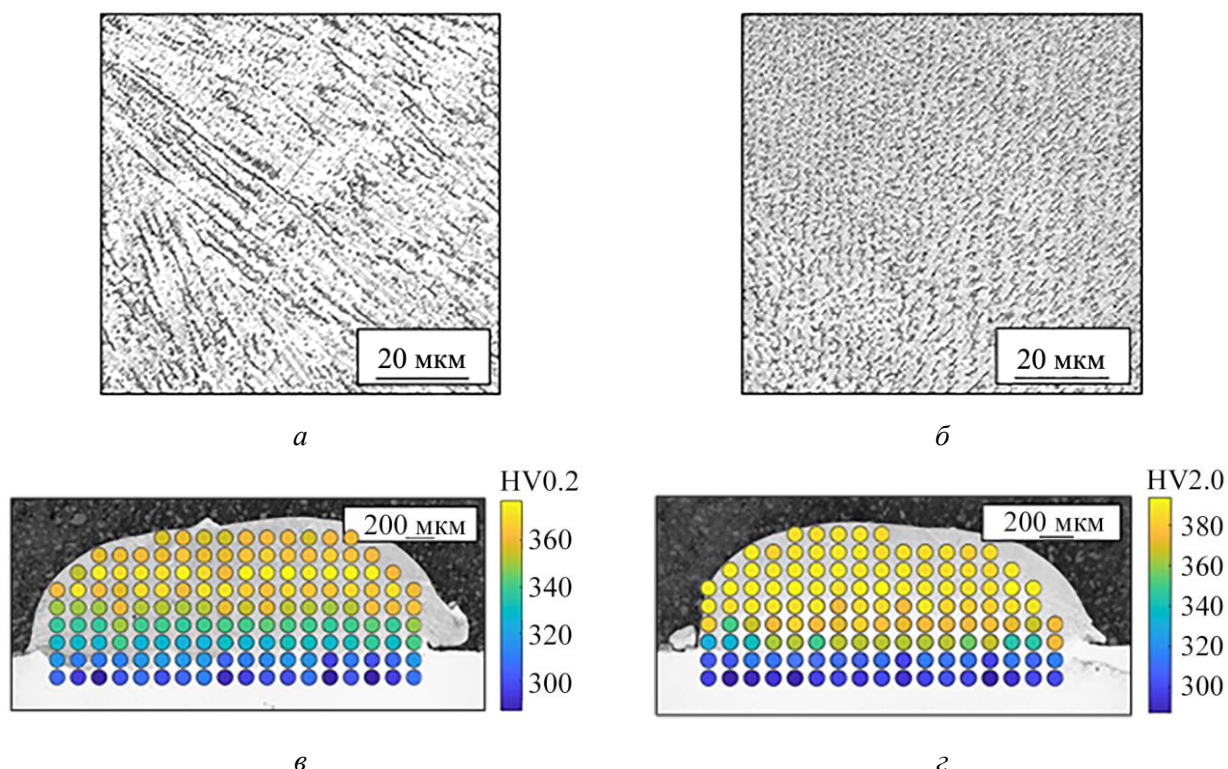


Рисунок 12 – Исследование микроструктуры и микротвердости сплава Inconel 625:  
*а* и *б* – микроструктуры, полученные методом ПЛВ без УЗК и с УЗК соответственно;  
*в* и *г* – микротвердости без УЗК и с УЗК соответственно

Установлено, что в результате ультразвукового воздействия микроструктура претерпевает переход от столбчатой формы дендритов к ячеистой равноосной, что впоследствии приводит к повышению микротвердости. Анализ микротвердости позволил выявить, что зона ОМ, полученная с ультразвуковым воздействием, не претерпела существенных изменений, абсолютная и относительная разности между экспериментами составляют 1,4 HV0.2 и 0,5% соответственно. Однако микротвердость зоны наплавленного металла, полученную с ультразвуковым воздействием, удалось увеличить по сравнению с экспериментом без ультразвукового воздействия. Абсолютная и относительная разности составляют 35,4 HV0.2 и 11,1% соответственно.

На рис. 13 приведены результаты исследований микроструктуры, распределения микротвердости и химических элементов (Fe, Ni) функционально-градиентного образца, полученного на основе металлических порошков EuTroLoy 16316D.04 (SS) и Inconel 625 (Inc) традиционным методом ПЛВ, а также с дополнительным ультразвуковым воздействием. Отмечены линии измерения и зоны, полученные при разном процентном содержании исходных металлических порошков.

Анализ микроструктуры зон различного состава исследуемого образца показал переход структуры от столбчатых дендритов к ячеистой равноосной. Анализ

микротвердости для обоих экспериментов с ультразвуковым воздействием и при его отсутствии представлен характерным спадом значений при переходе от 100%-ного состава Inconel 625 к 100%-ному составу нержавеющей стали.

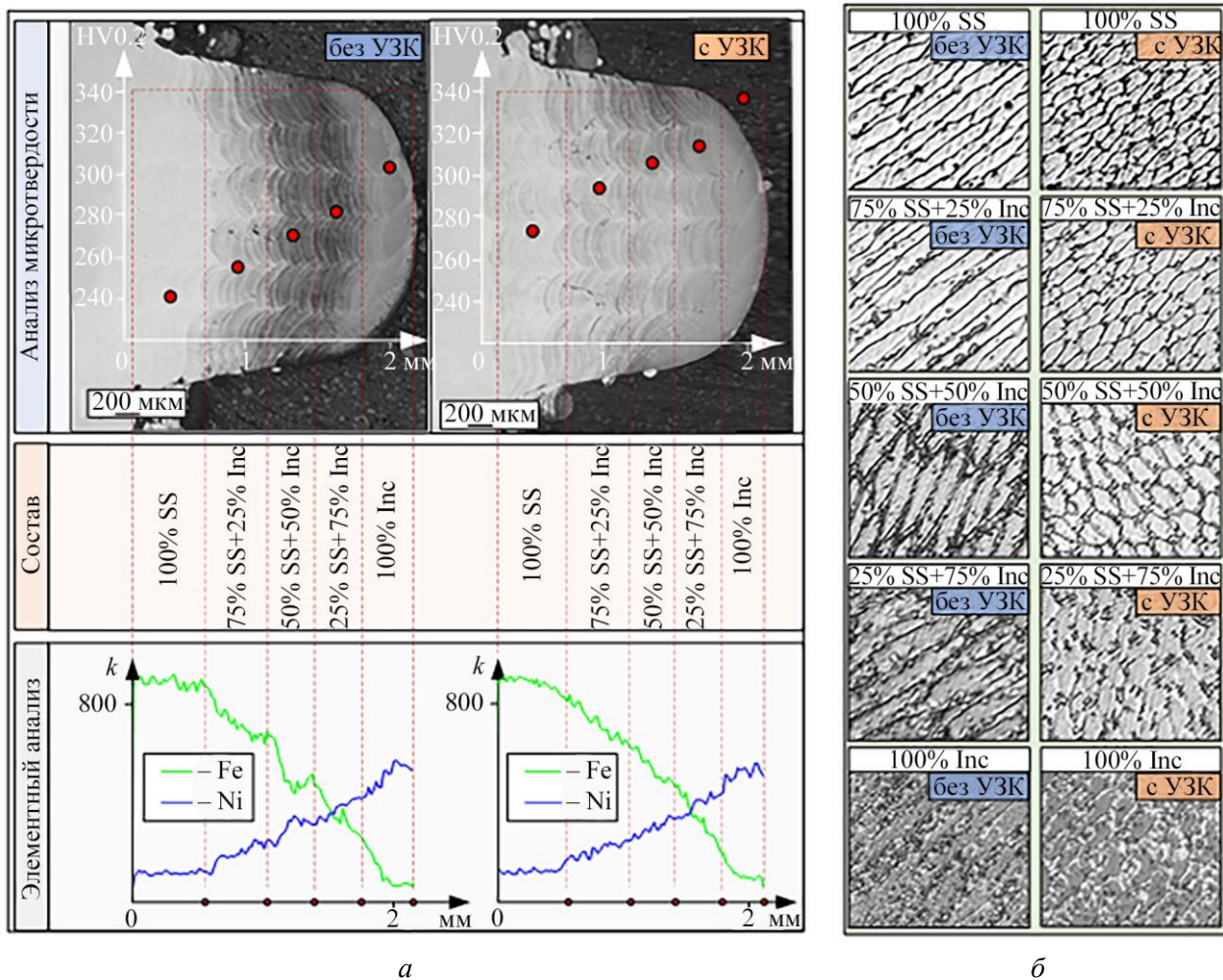


Рисунок 13 – Исследование функционально-градиентного образца:  
*а* – микротвердости и химического состава; *б* – микроструктуры

В табл. 2 приведены результаты расчета средних значений микротвердости для каждой зоны различного химического состава в полученном функционально-градиентном образце.

Таблица 2 – Анализ микротвердости функционально-градиентного материала

Состав	УЗ	Микротвердость	Относительная разность, %
100% SS	Нет	242 HV0.2	13,2
	Да	274 HV0.2	
75% SS+25% Inc	Нет	256 HV0.2	14,8
	Да	294 HV0.2	
50% SS+50% Inc	Нет	271 HV0.2	12,9
	Да	306 HV0.2	
25% SS+75% Inc	Нет	282 HV0.2	13,9
	Да	319 HV0.2	
100% Inc	Нет	304 HV0.2	10,5
	Да	336 HV0.2	

Таким образом, было выявлено повышение микротвердости от 10,5 до 14,8% в различных зонах функционально-градиентного образца, полученного методом ПЛВ с ультразвуковым воздействием.

Установлено, что относительное содержание Si, Cr, Mn, Mo и Al остается практически неизменным в обоих экспериментах. Однако в металле образца, выращенного без ультразвукового воздействия, обнаружены резкие переходы и скачки в относительной интенсивности химических элементов Fe и Ni, что особенно заметно при переходе от одного нанесенного слоя к другому. В металле образца, выращенного с ультразвуковым воздействием, по данным EDS-анализа наблюдается сглаживание относительной интенсивности элементов Fe и Ni, при котором резкие переходы и скачки не наблюдаются. При этом относительное изменение интенсивности элементов Fe и Ni происходит в пределах 10-12%.

**В заключении** приведены основные результаты диссертационной работы.

**В приложении 1** представлен патент на изобретение, **в приложении 2** – акт об использовании в учебном процессе результатов диссертационного исследования, **в приложении 3** – акт внедрения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты и выводы работы:

**1.** Разработано экспериментальное оборудование для исследования методов ЛТО и ПЛВ с возможностью воздействия на механизм кристаллизации жидкой ванны расплава посредством ультразвуковых вибраций мощностью 100 Вт, частотой 22 кГц и 40 кГц соответственно. Вспомогательные приспособления (основание, система охлаждения) были спроектированы с учетом индивидуальных конструктивных особенностей подобранных ультразвуковых излучателей Ланжевена и изготовлены методом послойной 3D-печати по принципу FDM. Эффективность ультразвуковой передачи в процессе лазерной обработки осуществляется за счет точного сопряжения поверхностей и прижатия металлических пластин к поверхности ультразвукового излучателя Ланжевена.

**2.** Разработана методика исследования геометрических параметров ванны расплава и микроструктуры, а также определена микротвердость нержавеющей сплава марки AISI 316L, полученного методом ЛТО с ультразвуковым воздействием частотой 40 кГц и мощностью 100 Вт. В результате анализа было установлено изменение геометрической формы ванны расплава, а также формирование мелкозернистой аустенитно-ферритной структуры с повышенным содержанием X-фазы и значением микротвердости.

**3.** Разработана методика исследования микроструктуры, позволяющая в автоматическом режиме рассчитать размеры столбчатых дендритов, а также построить гистограмму распределения и функцию нормального распределения с рассчитанными значениями математического ожидания и среднеквадратического отклонения. В диссертационной работе получены результаты исследований механических (микротвердость, прочность при статическом растяжении) и трибологических

характеристик (коэффициент трения) образцов, изготовленных традиционным методом ПЛВ и ПЛВ с ультразвуковым воздействием. В результате анализа было установлено формирование равномерной и мелкозернистой дендритной структуры с повышенным уровнем микротвердости, прочности при статическом растяжении и износостойкости.

4. Установлено, что ультразвуковое воздействие мощностью 100 Вт и частотой 22 кГц приводит к образованию мелкозернистой дендритной структуры в процессе ПЛВ из никелевого жаропрочного сплава марки Inconel 625. Анализ распределения микротвердости в полученных образцах показал повышение микротвердости в зоне наплавленного металла при неизменном уровне микротвердости в зоне основного металла.

5. Установлено, что ультразвуковое воздействие мощностью 100 Вт и частотой 22 кГц при синтезе функционально-градиентного материала на основе нержавеющей и никелевой сплавов приводит к изменению относительного содержания элементов Fe и Ni. Качественный анализ микроструктуры слоев показал уменьшение размеров столбчатых дендритов и их переход к мелкозернистой дендритной структуре. Анализ распределения микротвердости выявил повышение значений на каждом структурном слое функционально-градиентного образца.

### **Перспективы дальнейшей разработки темы**

Основное направление дальнейшей разработки темы диссертации это разработка комбинированного способа лазерной сварки однородных и разнородных материалов, а также наплавки или синтеза однородных, композиционных и функционально-градиентных материалов с приложением ультразвукового воздействия различной частоты и мощности на процесс кристаллизации, при котором источник ультразвуковых вибраций перемещается синхронно с источником лазерного излучения, при этом обеспечивается повышенный и постоянный уровень физико-механических свойств за счет микроструктурных изменений в сварных швах и покрытиях.

## **ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ**

### **В рецензируемых журналах из перечня ВАК РФ**

1. *Шварц, И.В.* Анализ микроструктуры и твердости сварных точек при лазерно-акустическом способе нагрева нержавеющей стали / И.В. Шварц, Я.В. Крылов, С.А. Никифоров, А.И. Горунов, А.Х. Гильмутдинов // Перспективные материалы. – 2025. – № 2. – С.44-45. – DOI: 10.30791/1028-978X-2025-2-80-88.

2. *Шварц, И.В.* Исследование микроструктуры и твердости сплава Inconel 625, полученного методом прямого лазерного выращивания с ультразвуковым воздействием / И.В. Шварц, А.Х. Гильмутдинов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2025. – Т 27. – №1. – DOI 10.15593/2224-9877/2025.1.04.

3. *Шварц, И.В.* Анализ влияния ультразвуковых колебаний на микроструктуру нержавеющей стали в процессе прямого лазерного выращивания / И.В. Шварц, С.А. Никифоров, А.И. Горунов, А.Х. Гильмутдинов // Перспективные материалы. – 2025. – № 2. – С.44-45. – DOI: 10.30791/1028-978X-2025-2-80-88.

4. *Шварц, И.В.* Синтез функционально-градиентного материала методом прямого лазерного выращивания с ультразвуковым воздействием / И.В. Шварц, С.А. Никифоров, А.И. Горунов, А.Х. Гильмутдинов // Перспективные материалы. – 2025. – № 2. – С.44-45. – DOI: 10.30791/1028-978X-2025-2-80-88.

5. *Шварц, И.В.* Влияние ультразвукового воздействия на механические и трибологические свойства нержавеющей стали в процессе прямого лазерного выращивания / И. В. Шварц, С. А. Никифоров, А. И. Горунов, А. Х. Гильмутдинов // Перспективные материалы. – 2026. – № 1. – С. 59-67. – DOI 10.30791/1028-978X-2026-1-59-67.

### **В научных журналах, индексируемых платформах Scopus и Web of Science**

6. *Shvarts, I.V.* The study of laser acoustic method for spot treatment of aisi 316l thin sheet steel / I.V. Shvarts, Ya.V. Krylov, S.A. Nikiforov, A.I. Gorunov, A.Kh. Gilmudtinov // Inorganic materials. – 2025. – Vol. 17. – No 2. – Pp. 133-142. – DOI 10.7242/1999-6691/2024.17.2.12

### **В других журналах и материалах научных конференций**

7. *Шварц, И.В.* Стратегии сканирования и их влияние на качество процесса прямого лазерного выращивания изделий из металла / В.В. Морозов, И.В. Шварц // XXVI Туполевские чтения (школа молодых ученых): Материалы международной молодежной научной конференции: сб. докл. – Казань, 09–10 ноября 2023 года. – Т. III. – Казань: – Казань: ИП Сагиев А.Р., 2023. – С. 375-379.

8. *Шварц, И.В.* Лазерно-акустический точечный способ обработки поверхности нержавеющей стали и ее последующий анализ / И.В. Шварц, Я.В. Крылов, С.А. Никифоров, А.И. Горунов, А.Х. Гильмутдинов // Высокие технологии в машиностроении: Материалы XXI Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, 10–12 апреля 2024 года. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2024. – С. 131-135.

9. *Шварц, И.В.* Механизм управления микроструктурой посредством ультразвукового воздействия в процессе лазерной обработки нержавеющей стали / И.В. Шварц, С.А. Никифоров, А.И. Горунов, А.Х. Гильмутдинов // Авиация и космонавтика: Тезисы 23-й Международной конференции. Москва, 18–22 ноября 2024 года. – Москва: ООО «Издательство "Перо"». – 2024. – С. 307-308.

10. *Шварц, И.В.* Анализ микроструктуры нержавеющей стали в процессе прямого лазерного выращивания с ультразвуковым воздействием / И.В. Шварц, А.Х. Гильмутдинов // Лазерные, плазменные исследования и технологии - ЛаПлаз-2025: Сборник научных трудов XI Международной конференции, Москва, 29–31 января 2025 года. – Москва: Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", 2025. – С. 76.

11. *Шварц, И.В.* Разработка автоматического алгоритма обработки оптических снимков микроструктуры нержавеющей стали для определения ее фазового состава / И.В. Шварц, А. Х. Гильмутдинов // Цифровые системы и модели: теория и практика проектирования, разработки и использования: Материалы международной научно-практической конференции, Казань, 10–11 апреля 2025 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2025. – С. 729-731.

12. *Шварц, И.В.* Влияние ультразвуковых колебаний на свойства функционально-градиентного образца в процессе прямого лазерного выращивания / И.В. Шварц, А.Х. Гильмутдинов // СМиС-2025. Технологии управления качеством: материалы международной научно-технической конференции, Москва, 21–24 мая 2025 года. – Москва: Московский политехнический университет, 2025. – С. 95-99.

### Патенты

13. Пат. 2789411 С1 Российская Федерация, МПК В23К 26/21, В23К 26/346, В23К 28/02. Способ сварки материалов в ультразвуковых полях и устройство, его реализующее / Гильмутдинов А.Х., Нагулин К.Ю., Шварц И.В.; заявитель и патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ». – №2021119308; заявл.22.04.22; опубл. 02.02.23, Бюл. №4. – 12 с.

### Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

14. *Шварц, И.В.* Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024662569. Программа полуавтоматического измерения площади поверхности сварочной ванны / И.В. Шварц, С.А. Никифоров, А.Х. Гильмутдинов. – Москва: Роспатент, 2024.

15. *Шварц, И.В.* Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024669223. Программа для определения процентного содержания фазовых составляющих микроструктуры нержавеющей стали / И.В. Шварц, С.А. Никифоров, А.Х. Гильмутдинов. – Москва: Роспатент, 2024.

16. *Шварц, И.В.* Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024693577. Программа для определения распределения по размерам столбчатых дендритов, образованных в процессе прямого лазерного выращивания образцов из нержавеющей стали / И.В. Шварц, С.А. Никифоров, А.Х. Гильмутдинов. – Москва: Роспатент, 2025.

Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 1,4. Тираж 100 экз. Заказ Д54.

---

Издательство КНИТУ-КАИ  
420111, Казань, К. Маркса, 10