

На правах рукописи



Рашковец Мария Владимировна

**СТРУКТУРА И СВОЙСТВА НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ, ПОЛУЧЕННЫХ  
ПО АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА  
ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ**

Специальность: 2.6.17– материаловедение

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Новосибирск  
2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

**Научный руководитель:** доктор технических наук, доцент  
Никулина Аэлита Александровна

**Официальные оппоненты:** Шаркеев Юрий Петрович,  
доктор технических наук, профессор,  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория физики наноструктурных биоконпозитов, заведующий лабораторией, главный научный сотрудник;

Соболева Наталья Николаевна,  
кандидат технических наук,  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук, лаборатория конструкционного материаловедения, старший научный сотрудник.

**Ведущая организация:** Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», г. Самара.

Защита состоится «30» июня 2022 г. в 14<sup>00</sup> на заседании диссертационного совета 24.2.347.03, созданного на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, I корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета, а также на официальном сайте [www.nstu.ru](http://www.nstu.ru)

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
канд. техн. наук, доцент



Андрей Геннадиевич Тюрин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В последние годы во многих странах активно развиваются подходы к производству металлических изделий с использованием аддитивных технологий. Из совокупности применяемых на практике разработок следует выделить технические решения, основанные на автоматизации процессов, позволяющие методом послойной лазерной наплавки с использованием трехмерных цифровых моделей (*CAD/CAM*) воспроизводить геометрию сложных по конфигурации деталей. Возможности по обеспечению точной геометрии изделий, которыми обладают отмеченные технологии, являются их основным преимуществом перед классическими производственными процессами. В качестве направлений, предпочтительных для внедрения аддитивных технологических процессов, следует выделить авиа- и ракетостроение. Типичные для этих отраслей детали характеризуются сложным профилем, наличием внутренних криволинейных каналов и тонкостенных пересекающихся ребер.

Одну из основных групп материалов, применяемых в авиа- и ракетостроении, представляют сплавы на основе никеля. Сплавы этого типа характеризуются повышенным комплексом механических и физико-химических свойств, в том числе длительной прочностью, сопротивлением ползучести, коррозионной стойкостью. Многообразие структурных состояний, обеспечивающих проявление твердорастворного и дисперсионного механизмов упрочнения, а также присутствие в структуре сплавов нежелательных  $\delta$ -фазы, фаз Лавеса и ряда карбидов, определяется технологией получения и процессами термической обработки сплавов, режимы которых назначаются в соответствии с их химическим составом.

**Степень разработанности темы исследования.** В научной литературе, связанной с изучением аддитивных процессов получения металлических материалов, в том числе никелевых сплавов, преобладают публикации зарубежных авторов. Первые отечественные глубокие исследования, связанные с анализом селективного лазерного спекания/сплавания (*SLS/SLM*) никелевых сплавов, выполнены специалистами Всероссийского научно-исследовательского института авиационных материалов «ВИАМ». Исследования процессов структурообразования, происходящих в металлических материалах при реализации аддитивных технологий, также активно проводятся в НИТУ «МИСиС», СПбПУ, МГТУ «СТАНКИН», МГТУ им. Н.Э. Баумана, ИФПМ СО РАН, Самарском университете имени академика С.П. Королева и ряде других российских организаций.

Несмотря на большой объем исследований никелевых сплавов, полученных с использованием аддитивных технологий, однозначных представлений о структурно-фазовых преобразованиях при послойной наплавке сплавов не сформировано. Результаты многих работ противоречивы. Информация о различных структурных состояниях материалов близкого химического состава, которую можно встретить в современной литературе, обусловлена особой чувствительностью аддитивных процессов к изменению технологических параметров. Так, например, в ряде работ отмечается возможность подавления распада пересыщенного твердого раствора при высоких скоростях охлаждения материала. При этом

в соответствии с экспериментальными данными, представленными в других литературных источниках, результатом твердофазной диффузии, имеющей место при накоплении тепла в сплаве от повторного прохождения источника нагрева, является формирование различных типов фаз. При усложнении составов наплавляемых материалов проблема выбора рациональных режимов аддитивной обработки становится еще более существенной.

Учитывая вышеизложенное, понимание фазовых преобразований, происходящих при реализации аддитивных процессов, представляет особый интерес как с точки зрения развития современного материаловедения, так и с позиции практического применения анализируемой технологии. Таким образом, проведение тонких структурных исследований никелевых сплавов, сформированных с использованием аддитивной технологии методом прямого лазерного выращивания, является актуальной задачей.

Исследования по теме диссертационной работы проводились в рамках грантов РФФИ № 19-38-50044 «Экспериментальное исследование жаропрочных никелевых сплавов, полученных аддитивным методом высокоскоростного прямого лазерного выращивания» (2019–2020 гг.) и № 19-38-90131 «Исследование закономерностей усталостного и динамического разрушения жаропрочных сплавов, полученных аддитивными технологиями» (2019–2021 гг.), госзадания FSUN-2020-0014 «Исследование метастабильных структур, формируемых на поверхностях и границах раздела материалов при экстремальном внешнем воздействии» (2019-0931).

**Цель диссертационной работы** заключается в выявлении особенностей структурно-фазовых преобразований заготовок при реализации аддитивного процесса методом прямого лазерного выращивания и изучении влияния технологических режимов на свойства никелевых сплавов систем *Ni-Cr-Mo*, *Ni-Co-Cr*, *Ni-Fe-Cr*.

Для достижения отмеченной цели решались следующие **задачи**:

1. Оценка структурно-фазового состояния исходного порошкового материала.
2. Анализ влияния технологических параметров на формирование структуры высоколегированных никелевых сплавов при реализации аддитивного процесса методом прямого лазерного выращивания.
3. Исследование на различных масштабных уровнях особенностей строения и фазового состава высоколегированных никелевых сплавов, полученных при варьировании технологических режимов аддитивного процесса прямого лазерного выращивания.
4. Анализ влияния структуры и фазового состава на комплекс механических свойств никелевых сплавов систем *Ni-Cr-Mo*, *Ni-Co-Cr*, *Ni-Fe-Cr*, полученных с использованием аддитивного процесса.

#### **Научная новизна**

1. Установлено, что при реализации аддитивного процесса методом прямого лазерного выращивания заготовок в виде совокупности слоев высотой 0,04 мм структура никелевых сплавов систем *Ni-Cr-Mo* и *Ni-Co-Cr* с минимально

разориентированными столбчатыми дендритами, протяженными через множество слоев, возникает при наплавке порошкового материала с эффективной энергией лазерного излучения на уровне 32 Дж/мм<sup>2</sup>. С ростом эффективной энергии лазерного излучения от 6,7 до 32 Дж/мм<sup>2</sup> зафиксировано снижение пористости наплавленных слоев в 4,3 раза. Увеличение шага слоя до 0,6 мм при наплавке с энергией лазерного излучения в пределах от 21,2 до 23,6 Дж/мм<sup>2</sup> сопровождается образованием явно выраженных зон переплава (сплавления) и формированием прерывистых столбчатых дендритов. Возникшие таким образом зоны характеризуются бездефектным строением и не оказывают существенного влияния на комплекс механических свойства «многослойных» материалов.

2. Методом просвечивающей электронной микроскопии выявлены особенности формирования морфологии наноразмерных частиц  $\gamma'$ -фазы  $Ni_3Al$ , выделяющихся в структуре дисперсионно-твердеющего никелевого сплава системы  $Ni-Co-Cr$ . Экспериментально установлено влияние эффективной энергии лазерного излучения на форму и размеры выделившихся частиц. Для наплавки с малым уровнем энергии (12–16 Дж/мм<sup>2</sup>) характерно выделение из матричной фазы округлых по форме частиц размером 20–40 нм. Повышение энергии до 24 Дж/мм<sup>2</sup> сопровождается формированием в сплаве кубовидных частиц  $\gamma'$ -фазы  $Ni_3Al$  со средним размером 45 нм. Переход к сферической морфологии выделений при повышении энергосклада до уровня 32 Дж/мм<sup>2</sup> происходит за счет перераспределения  $\gamma'$ -образующих элементов при выделении в междендритных пространствах бóльшего количества первичных карбидов.

3. Образование пластинчатых частиц  $\delta$ -фазы в процессе прямого лазерного выращивания заготовок из сплава системы  $Ni-Cr-Mo$  преимущественно происходит по границам зерен. При наплавке материалов с уровнем эффективной энергии лазерного излучения 6,7 Дж/мм<sup>2</sup> длина возникших частиц не превышает 200 нм. Повышение энергии до 20–26,7 Дж/мм<sup>2</sup> приводит к росту пластин до ~ 500 нм. При этом длина пластин  $\delta$ -фазы, выделившихся совместно с эвтектикой, составляет 1–2 мкм. Образования игольчатых частиц  $\delta$ -фазы, снижающих механические свойства материала, не зафиксировано.

4. С использованием методов просвечивающей электронной микроскопии в никелевом сплаве системы  $Ni-Fe-Cr$ , наплавленном с уровнем эффективной энергии лазерного излучения 21,2–23,6 Дж/мм<sup>2</sup>, зафиксировано выделение частиц  $\gamma'$ -фазы  $Ni_3Al$ . Дополнительная термическая обработка сплавов сопровождается увеличением упрочняющих частиц  $\gamma'$ -фазы до ~ 1 мкм. Равномерное распределение упрочняющих  $\gamma'$ -частиц в объеме сплава при сохранении его дендритной структуры способствует двукратному увеличению прочностных характеристик и повышению ударной вязкости материала в 1,5 раза.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Результаты комплексного исследования, полученные при выполнении диссертационной работы, расширяют представления о природе структурно-фазовых преобразований, развивающихся в никелевых сплавах систем  $Ni-Fe-Cr$ ,  $Ni-Co-Cr$  и  $Ni-Cr-Mo$  при реализации аддитивных процессов. Показано, что минимальный уровень эффек-

тивной энергии лазерного излучения, необходимый для формирования ориентированных в направлении теплового потока столбчатых дендритов, проходящих через множество слоев, в ходе послойной наплавки, составляет 24 Дж/мм<sup>2</sup>. С использованием методов электронной микроскопии подробно изучена морфология формирующихся стабильных и метастабильных фаз при различных условиях реализации аддитивного процесса по схеме прямого лазерного выращивания заготовок. Высокие скорости охлаждения и периодически повторяющееся термическое воздействие на материал способствуют началу развития выделения упрочняющих фаз в сплавах на основе систем *Ni-Cr-Mo* и *Ni-Fe-Cr* в интервалах эффективной энергии лазерного излучения 20–26,7 Дж/мм<sup>2</sup> и 21,2–23,6 Дж/мм<sup>2</sup>, соответственно. Варьирование эффективной энергии лазерного излучения оказывает влияние на морфологию упрочняющей  $\gamma'$ -фазы в дисперсионно-твердеющем никелевом сплаве системы *Ni-Co-Cr*. С повышением мощности вводимой энергии (12–32 Дж/мм<sup>2</sup>) форма частиц изменяется от округлой до близкой к кубической. Максимально приближенная к кубу форма частиц  $\gamma'$ -фазы наблюдается при эффективной энергии лазерного луча на уровне 24 Дж/мм<sup>2</sup>.

Результаты исследований структуры послойно наплавленных материалов и комплекса их механических свойств способствуют решению прикладных задач, актуальных для аддитивного производства. Повышение уровня эффективной энергии лазерного излучения до 20 Дж/мм<sup>2</sup> (система *Ni-Cr-Mo*) и до 24 Дж/мм<sup>2</sup> (система *Ni-Co-Cr*) при фиксированном шаге единичного слоя 0,04 мм является эффективным техническим решением, обеспечивающим формирование качественных «многослойных» материалов. При послойной наплавке никелевого порошка (система *Ni-Fe-Cr*) с шагом слоя 0,6 мм и эффективной энергией лазерного луча более 21,2 Дж/мм<sup>2</sup> пористость полученных сплавов не превышает 1,1 %.

Результаты проведенных исследований используются в учебном процессе в Новосибирском государственном техническом университете при реализации образовательной программы бакалавриата по направлению 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов» (в курсах «Технология конструкционных материалов» и «Физические методы исследования материалов»).

**Методология и методы исследования.** Объектами исследований являлись используемые в промышленном производстве высоколегированные никелевые сплавы систем *Ni-Cr-Mo* (*Inconel 625*), *Ni-Co-Cr* (ЭП741) и *Ni-Fe-Cr* (*Inconel 718*). Образцы получали аддитивным методом по схеме прямого лазерного выращивания в Санкт-Петербургском государственном морском техническом университете. Пробоподготовка, структурно-фазовые исследования и механические испытания материалов в условиях статического, динамического и циклического нагружения проводились с использованием оборудования центра коллективного пользования «Структура, механические и физические свойства материалов» НГТУ. Основными методами структурных исследований являлись световая микроскопия (*Carl Zeiss Axio Observer A1m*), растровая (*Carl Zeiss EVO50 XVP*) и просвечивающая (*FEI Tecnai 20 G2 TWIN*) электронная микроско-

пия. Фазовый состав материалов оценивали методами рентгеновской (дифрактометр *ARL X'TRA*) и электронной (*FEI Tecnai 20 G2 TWIN*) дифракции. Характер распределения химических элементов в анализируемых материалах изучали с применением метода микрорентгеноспектрального анализа (*EDS X-Act Oxford Instruments* и *EDAX*). Для оценки микротвердости исследуемых материалов использовали полуавтоматический микротвердомер *Wolpert Group 402 MVD*. Испытания материалов в условиях одноосного растяжения проводили на установке *Instron 3369*. Испытания на ударный изгиб были реализованы с применением маятникового копра *Instron CEAST 9050 Impact Pendulum*. При проведении циклических испытаний применялась сервогидравлическая универсальная испытательная установка *Instron 8801*.

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Повышение уровня эффективной энергии лазерного излучения в диапазоне от 6,7 до 32 Дж/мм<sup>2</sup> является одним из основных технологических факторов, обеспечивающих снижение пористости «многослойных» никелевых сплавов систем *Ni-Cr-Mo* и *Ni-Co-Cr*, сформированных при использовании аддитивного процесса методом прямого лазерного выращивания заготовок с шагом слоя 0,04 мм.

2. Контроль шага формируемого слоя и уровня эффективной энергии лазерного излучения в ходе реализации аддитивного процесса позволяет формировать дендритную структуру требуемого типа. Прямое лазерное выращивание заготовок с уровнем эффективной энергии лазерного излучения в диапазоне 24–32 Дж/мм<sup>2</sup> при шаге единичного слоя 0,04 мм обеспечивает формирование ориентированных в направлении теплового потока столбчатых дендритов, проходящих через множество слоев.

3. Уровень эффективной энергии лазерного излучения 6,7–26,7 Дж/мм<sup>2</sup> при шаге слоя 0,04 мм исключает образование  $\delta$ -фазы игольчатой морфологии, оказывающей негативное влияние на комплекс механических свойств никелевых сплавов системы *Ni-Cr-Mo*.

4. Формирование карбонитридов типа  $(Nb,Ti)NC$  в никелевом сплаве системы *Ni-Fe-Cr* сопровождается перераспределением химических элементов в объеме сплава при его последующей термической обработке с выделением частиц упрочняющей  $\gamma'$ -фазы  $Ni_3Al$ , что благоприятно отражается на комплексе механических свойств материала. Образование  $\gamma'$ -частиц в объеме материала не приводит к формированию высоких локальных напряжений вблизи частиц фазы Лавеса и смежных с ними выделений  $\delta$ -фазы. При встрече с указанными построениями магистральная трещина либо тормозится, либо продвигается в материале по механизму огибания препятствий.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность полученных результатов обеспечивается применением комплекса современных методов исследований, использованием аналитического и испытательного оборудования мирового уровня.

Результаты работы были представлены и обсуждены на международной

конференции «Пленки и покрытия-2021» (г. Санкт-Петербург, 2021 г.); международном молодежном форуме «Ломоносов-2020» (г. Москва, 2020 г.); международной конференции «Фундаментальные основы механохимических технологий» (г. Новосибирск, 2018 г.); международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы в машиностроении» (г. Новосибирск, 2017–2018 г.); научном семинаре с международным участием «Междисциплинарные проблемы аддитивных технологий» (г. Томск, 2017–2019 гг).

### **Публикации**

По результатам диссертационных исследований опубликовано 12 печатных работ, 2 из которых входят в журналы, рекомендованные ВАК, 8 публикаций представлены в изданиях, индексируемых в базах *Web of Science* и *Scopus*, 2 – в сборниках трудов докладов международных научно-технических конференций.

**Личный вклад** автора работы состоял в формулировании задач диссертационного исследования, подготовке образцов для всех видов исследований, проведении структурного анализа с использованием световой микроскопии, оценке фазового состава методами РФА и дифракции электронов, проведении механических испытаний, а также анализе полученных экспериментальных данных, их обобщении и сопоставлении с литературными данными, формулировании выводов.

**Соответствие паспорту заявленной специальности.** Тема и содержание диссертационной работы соответствуют пунктам 1, 2, 5 научной специальности 2.6.17 – Материаловедение (в соответствии с предыдущей редакцией номенклатуры паспорту специальности 05.16.09 – Материаловедение (в машиностроении)).

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения и 2 приложений. Полный объем диссертации составляет 164 страницы, включая 77 рисунков и 8 таблиц. Список литературы содержит 247 наименований.

Автор выражает благодарность к.т.н. Климовой-Корсмик О. Г. за консультации при проведении исследований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность работы и отражена область диссертационного исследования, сформулированы цель и задачи, отмечены научная и практическая значимость, отражены апробация и полученные результаты, представлены положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** представлен аналитический обзор результатов теоретических и экспериментальных исследований, выполненных отечественными и зарубежными специалистами по теме диссертационной работы. Описаны механизмы упрочнения и морфология фаз никелевых сплавов. Приведены примеры классических технологий обработки никелевых сплавов, используемых в промышленности, а также рассмотрены современные аддитивные технологические процессы.

**Во второй главе** приведены результаты исследования морфологии и фазового состава исходных порошков никелевых сплавов систем *Ni-Cr-Mo*,



*Ni-Co-Cr* и *Ni-Fe-Cr*. Описан технологический процесс получения экспериментальных образцов с применением аддитивного метода по схеме прямого лазерного выращивания заготовок. Представлены методы исследования структуры и фазового состава, а также методы механических испытаний образцов в условиях статического, динамического и циклического нагружения сформированных материалов.

Средний размер сферических гранул исходных порошков находился в диапазоне 50–90 мкм. Фазовый состав исходных материалов был представлен твердым раствором на основе никеля. Образцы получены в Санкт-Петербургском государственном морском техническом университете при наплавке с мощностью лазерного излучения от 250 до 1500 Вт (эффективная энергия лазерного луча 6,7–32 Дж/мм<sup>2</sup>, шаг единичного слоя от 0,04 до 0,6 мм).

Третья глава работы посвящена оценке дефектов микроструктуры, возникающих в никелевых сплавах при их послойной наплавке, а также выявлению закономерностей формирования зеренного строения материалов при различных значениях энергии лазерного излучения с величиной шага слоя 0,04 мм (сплавы систем *Ni-Cr-Mo*, *Ni-Co-Cr*) и 0,6 мм (сплав системы *Ni-Fe-Cr*).

При послойной наплавке порошков никелевых сплавов систем *Ni-Cr-Mo* и *Ni-Co-Cr* в диапазоне эффективной энергии лазерного луча 6,7–12 Дж/мм<sup>2</sup> (мощность лазерного излучения 250–450 Вт) с шагом единичного слоя 0,04 мм полного плавления частиц исходного порошка (60–90 мкм) не происходит. Микроструктура полученных при этом материалов характеризуется присутствием множества неслитин. Увеличение энергии лазерного излучения от 6,7 до 32 Дж/мм<sup>2</sup> (мощность лазерного луча 250–1200 Вт) при послойной наплавке материалов с шагом слоя 0,04 мм сопровождается четырехкратным снижением пористости образцов (с 3 % до 0,7 %), что обусловлено устранением неслитин и уменьшением количества пор. Пористость сплава системы *Ni-Fe-Cr*, наплавленного с шагом слоя 0,6 мм в интервале эффективной энергии лазерного излучения 21,2–23,6 Дж/мм<sup>2</sup> (мощность лазерного излучения 1300–1500 Вт), не превышает 1,1 %.

Присутствие дендритных построений является особенностью, характерной

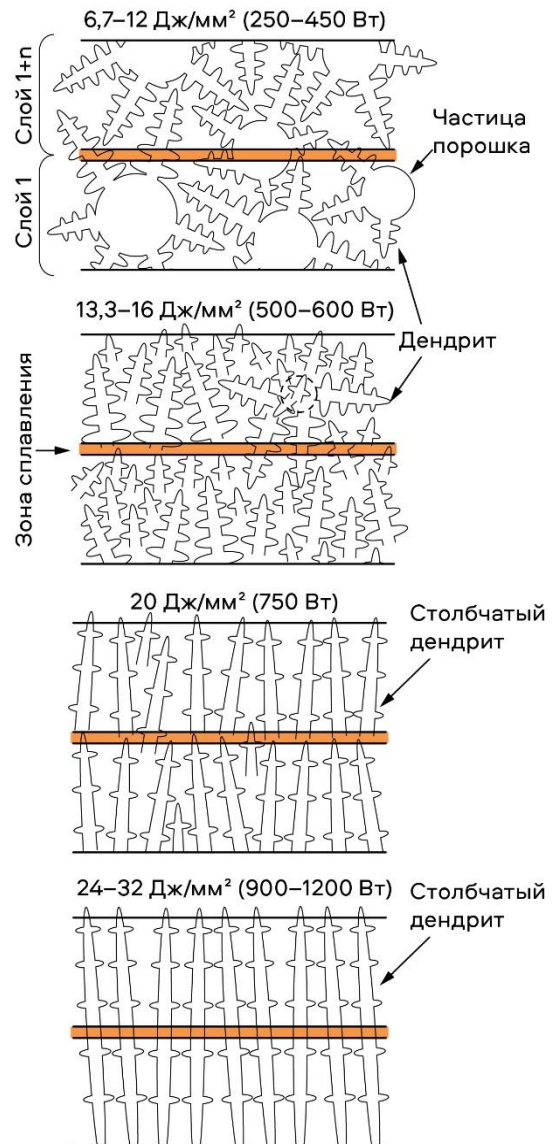


Рисунок 1 – Схема продольных сечений образцов, полученных при различных значениях мощности лазерного излучения с шагом слоя 0,04 мм

для всех материалов, полученных аддитивным методом. Установлено, что тип дендритных построений тесно коррелирует с величиной энергии лазерного излучения и шагом слоя. При послойной наплавке никелевых порошков (*Ni-Cr-Mo* и *Ni-Co-Cr*) с энергией лазерного излучения в диапазоне 13,3–20 Дж/мм<sup>2</sup> (500–750 Вт) и шагом единичного слоя 0,04 мм в структуре сплавов формируются разориентированные дендритные построения. Повышение энергии до 24–32 Дж/мм<sup>2</sup> (900–1200 Вт) сопровождается снижением скорости охлаждения материала и одновременным ростом температурного градиента на границах между последовательно наплавленными слоями. Это создает благоприятные условия для роста ориентированных в направлении теплового потока протяженных столбчатых дендритов через соседние слои (рисунок 1). Угол разориентации проходящих через множество слоев столбчатых кристаллов уменьшается с ~ 10 град. при использовании энергии в интервале 24–26,7 Дж/мм<sup>2</sup> (900–1000 Вт) до ~ 7 град. при увеличении энергии до 32 Дж/мм<sup>2</sup> (1200 Вт).

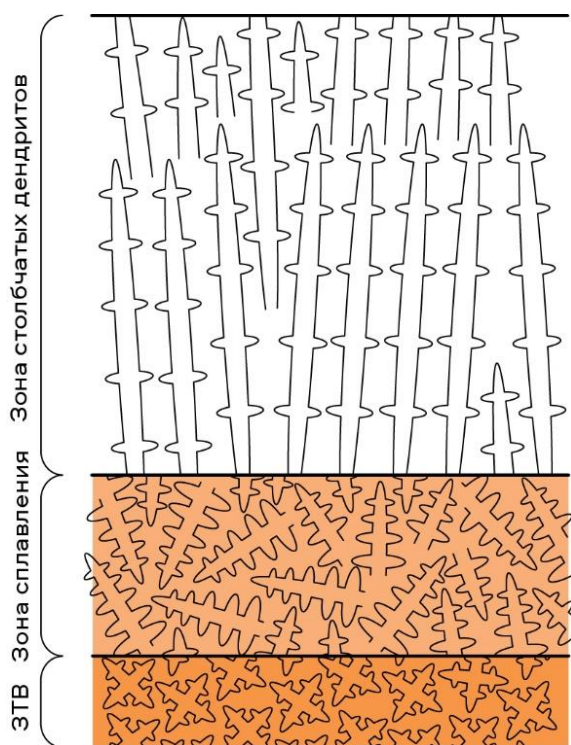


Рисунок 2 – Схема продольного сечения образца, полученного при наплавке с шагом слоя 0,6 мм в интервале мощности лазерного излучения 1300–1500 Вт

Снижение температуры зоны контакта слоев в материале системы *Ni-Fe-Cr* при увеличении шага слоя до 0,6 мм в процессе послойной наплавки с энергией лазерного луча 21,2–23,6 Дж/мм<sup>2</sup> (1300–1500 Вт) приводит к появлению явно выраженных зон сплавления и сопровождается формированием прерывистых столбчатых дендритов во всем объеме материала (рисунок 2).

**В четвертой главе** диссертационной работы представлены результаты изучения структурно-фазовых преобразований в «многослойных» материалах, полученных методом прямого лазерного выращивания (сплавы систем *Ni-Cr-Mo*, *Ni-Co-Cr*, *Ni-Fe-Cr*) при различных технологических режимах, а также после дополнительной термической обработки образцов из сплава системы *Ni-Fe-Cr* (нагрев до 980 °С, выдержка в течение одного часа, последующее двухступенчатое старение при 720 °С и

620 °С с выдержками длительностью 8 часов, охлаждение на воздухе до комнатной температуры).

**Сплав системы *Ni-Cr-Mo*.** Анализ рентгенограмм образцов, полученных послойной наплавкой порошка никелевого сплава системы *Ni-Cr-Mo* с шагом единичного слоя 0,04 мм в интервале значений эффективной энергии лазерного луча 6,7–26,7 Дж/мм<sup>2</sup> (при мощности лазерного излучения 250–1000 Вт), показал, что основной фазой полученных материалов является твердый раствор на

основе никеля. С использованием микрорентгеноспектрального анализа зафиксировано повышение степени неоднородности распределения легирующих элементов в продольных сечениях образцов при повышении энергии лазерного излучения в интервале от 20 до 26,7 Дж/мм<sup>2</sup> (750–1000 Вт). Детальный анализ материалов, проведенный с использованием просвечивающей электронной микроскопии, позволил выявить особенности строения сплавов, соответствующие отмеченному распределению элементов (рисунок 3).

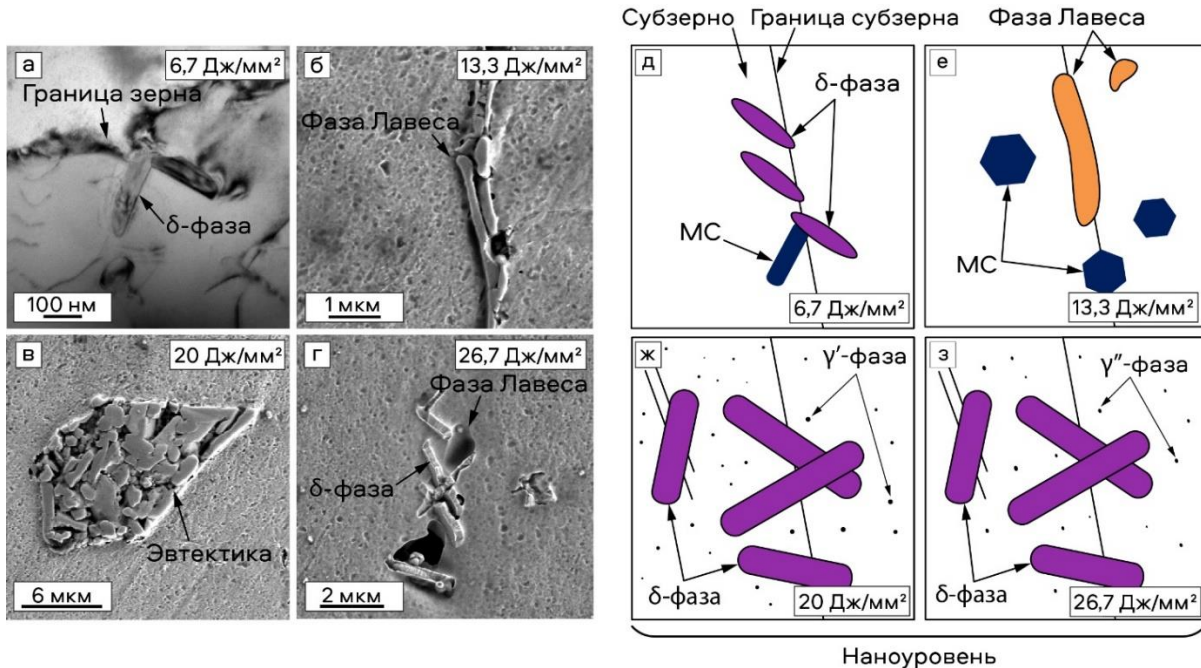


Рисунок 3 – Структура никелевого сплава системы *Ni-Cr-Mo* (а–г), полученного методом прямого лазерного выращивания, и ее схематическое представление при различных уровнях энергии лазерного излучения (д–з)

Для сплава системы *Ni-Cr-Mo*, обработанного по различным технологическим режимам аддитивного процесса прямого лазерного выращивания, характерно образование пластинчатых выделений орторомбической  $\delta$ -фазы на основе соединения  $Ni_3Nb$ . Для минимальной энергии лазерного излучения 6,7 Дж/мм<sup>2</sup> (250 Вт) свойственно образование отдельных зернограничных высокодисперсных частиц  $\delta$ -фазы ( $\leq 200$  нм) пластинчатого типа. Повышение энергии до 20 Дж/мм<sup>2</sup> (1000 Вт) приводит к формированию отдельных  $\delta$ -пластин размером  $\sim 0,5$  мкм не только по границам зерен, но и внутри них. Присутствие частиц фазы Лавеса, расположенных вдоль границ зерен, зафиксировано после наплавки никелевого порошка с энергией 13,3 Дж/мм<sup>2</sup> (500 Вт). Снижение скорости охлаждения сплава, имеющее место при повышении энергии лазерного излучения до 20–26,7 Дж/мм<sup>2</sup> (750–1000 Вт), способствует накоплению большего количества тепла при повторяющихся проходах лазера, что приводит к более активному развитию диффузионных процессов и образованию в материале эвтектических колоний произвольной геометрии ( $\sim 15$  мкм), состоящих из матричной фазы и фазы Лавеса, а также выделению пластин  $\delta$ -фазы на участках, смежных с частицами фазы Лавеса.

Детальное изучение строения матричной фазы послойно наплавленных образцов сплава системы *Ni-Cr-Mo* с использованием методов просвечивающей

электронной микроскопии, свидетельствует об отсутствии упрочняющих выделений в материалах, полученных в интервале малых значений энергии лазерного луча 6,7–13,3 Дж/мм<sup>2</sup> (250–500 Вт). Методом рентгенофазового анализа и дифракции электронов образцов, послойно наплавленных в интервале 20–26,7 Дж/мм<sup>2</sup> (750–1000 Вт), зафиксированы пики, соответствующие  $\gamma'$ - и  $\gamma''$ -фазам.

**Сплав системы Ni-Co-Cr.** Одна из задач диссертационной работы заключалась в оценке влияния энергии лазерного излучения на процесс формирования частиц  $\gamma'$ -фазы в условиях периодически повторяющегося высокотемпературного воздействия на никелевый сплав системы Ni-Co-Cr с дисперсионным механизмом упрочнения. Тонкие структурные исследования показали, что форма упрочняющих частиц в значительной степени определяется энергией лазерного луча. Электронограммы, зафиксированные при исследовании наплавленных образцов, показывают, что для всех технологических режимов обработки характерно формирование частиц  $\gamma'$ -фазы ( $Ni_3Al$ ), когерентных матрице. Об этом свидетельствуют слабые дифракционные максимумы от упорядоченной сверхрешетки, встроенные в плоскость ярких рефлексов решетки матрицы твердого раствора на основе никеля (рисунок 4).

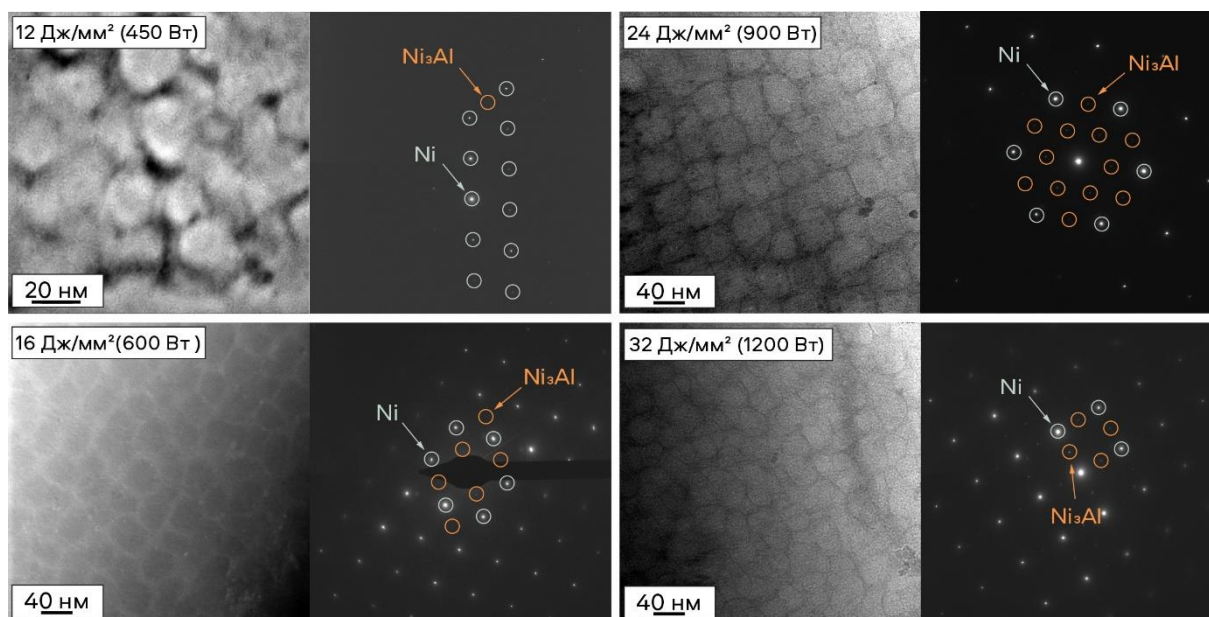


Рисунок 4 – Распределение  $\gamma'$ -частиц в сплаве системы Ni-Co-Cr, полученном при различных уровнях энергии лазерного излучения и соответствующие им микроэлектронограммы

В общем случае высокие скорости охлаждения материала способствуют измельчению частиц, выделяющихся в процессе многослойной наплавки. При этом их форма и характер распределения в матричной фазе различаются. Выделения  $\gamma'$ -фазы, возникающие при относительно быстром охлаждении сплавов с высоким градиентом температур, характерным для эффективной энергии лазерного излучения 12–16 Дж/мм<sup>2</sup> (с мощностью 450–600 Вт), представляют собой частицы 20–40 нм с формой, близкой к округлой. Снижение скорости охлаждения, обусловленное повышением энергии до 24–32 Дж/мм<sup>2</sup> (900–1200 Вт), приводит к формированию частиц, форма которых больше близка к кубической.

В соответствии с данными, полученными методом растровой электронной микроскопии, увеличение энергии лазерного луча сопровождается ростом числа карбидных включений. Элементный анализ наплавленного материала позволяет сделать вывод о том, что наблюдаемые в структуре карбидные частицы обогащены титаном. Этот факт свидетельствует о различии в перераспределении легирующих элементов с ростом мощности лазерного излучения, что, в свою очередь, может являться причиной уменьшения среднего размера частиц  $\gamma'$ -фазы, одним из основных элементов которой также является титан.

Одновременно с повышением энергии от 16 до 32 Дж/мм<sup>2</sup> (600–1200 Вт) в сплаве возрастает доля  $\gamma/\gamma'$ -эвтектики, распределенной в центрах междендритных промежутков. Характерной особенностью колоний является наличие внутри них карбидных выделений. Такой характер формирования структуры обусловлен, по всей видимости, особенностями развития эвтектической реакции в микрообъемах, обогащенных легирующими элементами (*Mo*, *Nb*, *Ti*), составляющими металлическую основу выделившихся первичных карбидов, а также повышенным содержанием  $\gamma'$ -образующих элементов в междендритном пространстве (рисунок 5).

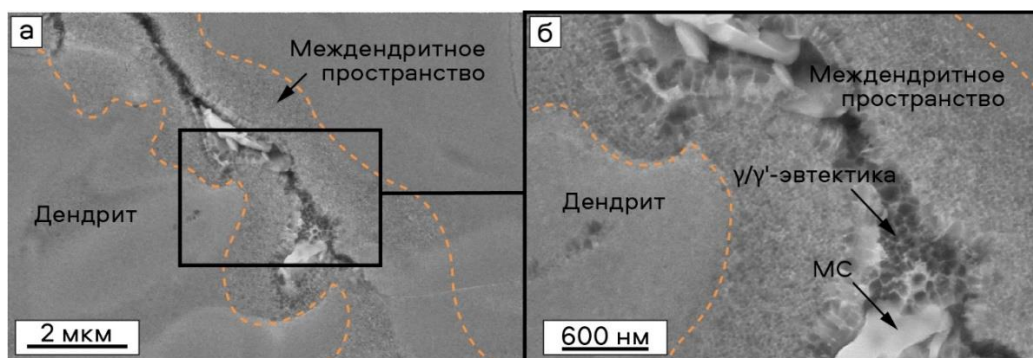


Рисунок 5 – Эвтектика и распределение частиц  $\gamma'$ -фазы в междендритном пространстве и внутри зерна в образце, наплавленном лазерным лучом мощностью 900 Вт.  
а – строение наплавленного материала; б – междендритное пространство

**Сплав системы *Ni-Fe-Cr*.** Средний размер выделений фазы Лавеса в сплаве системы *Ni-Fe-Cr*, полученном при реализации метода прямого лазерного выращивания с шагом единичного слоя 0,6 мм в диапазоне эффективной энергии лазерного излучения 21,2–23,6 Дж/мм<sup>2</sup> (1300–1500 Вт), составляет ~ 3–7 мкм. В качестве фактора, способствующего дискретному распределению формирующихся частиц, рассматриваются повышенные скорости охлаждения, соответствующие аддитивным процессам. С применением методов просвечивающей электронной микроскопии установлен химический состав отдельных частиц фазы Лавеса ( $Fe_2Ti$ ). Наряду с фазой Лавеса в структуре наплавленных материалов наблюдаются первичные карбиды, металлическая основа которых преимущественно представлена ниобием, молибденом и титаном, а также карбонитриды типа  $(Nb,Ti)(N,C)$ . Формирование данных соединений на ранних стадиях кристаллизации сплава происходит с участием нитрида титана  $TiN$ , центром кристаллизации которого являются частицы  $Al_2O_3$ . В областях, граничащих с карбонитридами  $(Nb,Ti)(N,C)$ , зафиксировано образование более сложных интерметаллидных соединений типа  $(Ni,Fe,Cr)_2(Nb,Mo,Si)$  (рисунок 6).

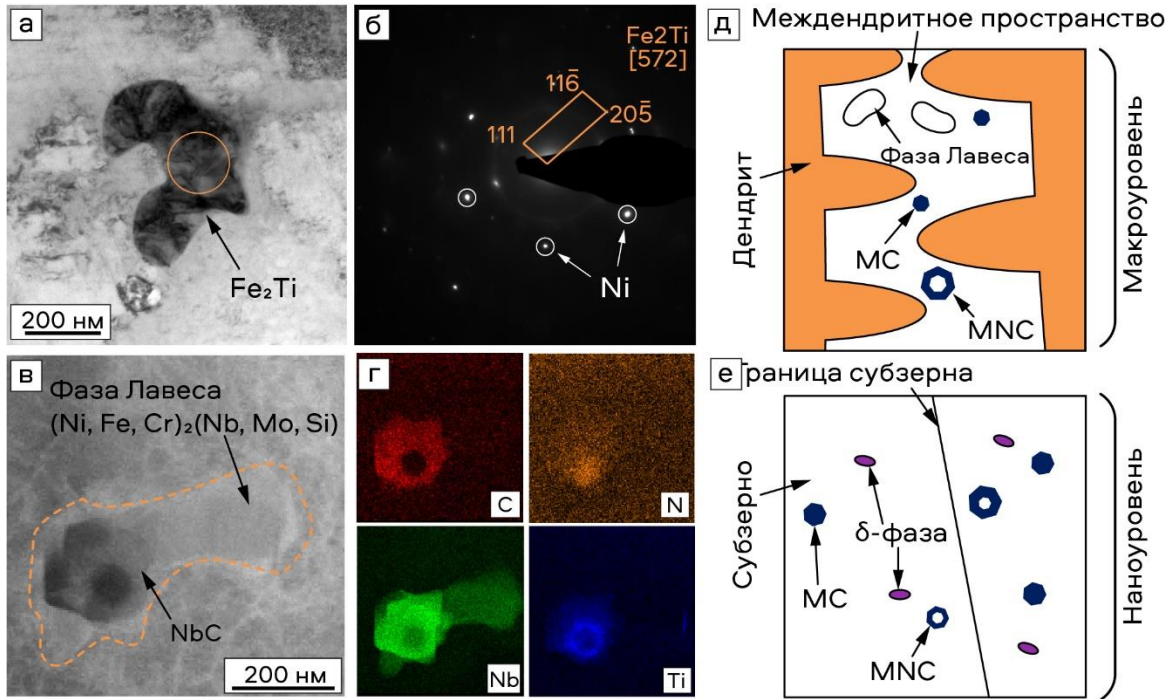


Рисунок 6 – Тонкое строение сплава на основе системы  $Ni-Fe-Cr$ . а – частица фазы Лавеса; б – электронная дифракция от участка, зафиксированного на рисунке а; в – карбонитрид  $(Nb,Ti)(N,C)$  и смежная с ним фаза Лавеса  $(Ni,Fe,Cr)_2(Nb,Mo,Si)$ ; г – элементный анализ частицы, представленной на снимке в; д, е – схематическое представление структуры сплава, сформированного методом прямого лазерного выращивания

Методом дифракции электронов зафиксированы пики от частиц упрочняющей  $\gamma'$ -фазы. Следует подчеркнуть, что при проведении микроструктурных исследований четко различимых частиц на снимках не наблюдается. Дальнейший нагрев образцов до  $980\text{ }^\circ\text{C}$  сопровождается частичным растворением фазы Лавеса с распределением высвободившегося ниобия в окружающих частицы микрообъемах. Результатом насыщения локальных зон ниобием является формирование смежных с фазой Лавеса частиц  $\delta$ -фазы ( $Ni_3Nb$ ). Так как большая доля ниобия находится в связанном состоянии в составе химических соединений  $(Nb,Ti)C$ ,  $(Nb,Ti)(N,C)$ , а также участвует в формировании  $\delta$ -фазы, результатом двухступенчатого старения сплава является выделение упрочняющей  $\gamma'$ -фазы на основе соединения  $Ni_3(Al,Ti)$  (рисунок 7).

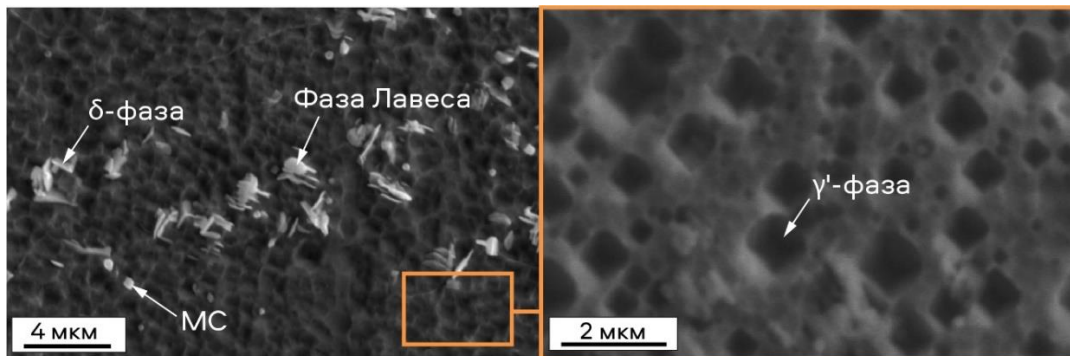


Рисунок 7 – Структурно-фазовое состояние никелевого сплава системы  $Ni-Fe-Cr$  После термической обработки

**В пятой главе** диссертационной работы представлены результаты оценки механических свойств сплавов, выращенных с применением аддитивного метода

прямого лазерного выращивания. В качестве материалов для механических испытаний были выбраны образцы, показавшие минимальную пористость (0,7–0,9 %) в состоянии после послойной наплавки (сплавы систем *Ni-Cr-Mo*, *Ni-Co-Cr*, *Ni-Fe-Cr*), а также после дополнительной термической обработки (сплав системы *Ni-Fe-Cr*). Нагружение образцов выполнялось в направлении, параллельном и перпендикулярном направлению роста слоев.

Согласно литературным данным, при статических испытаниях ориентация роста слоев оказывает незначительное влияние на уровень прочностных свойств аддитивно сформированных материалов. Анализ результатов испытаний на одноосное растяжение свидетельствует о том, что для послойно наплавленных образцов из никелевого сплава системы *Ni-Fe-Cr* при приложении нагрузки параллельно направлению роста слоев характерно снижение предела прочности с 630 до 530 МПа. Учитывая отмеченное, эксперименты по растяжению образцов из сплавов систем *Ni-Cr-Mo* и *Ni-Co-Cr* были выполнены по схеме с приложением растягивающей силы перпендикулярно росту слоев. Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что уровень прочностных свойств сплава системы *Ni-Co-Cr* выше по сравнению с системами *Ni-Fe-Cr* и *Ni-Cr-Mo*, что обусловлено формированием высокодисперсных частиц  $\gamma'$ -фазы при наплавке никелевого порошка.

Анализ ударной вязкости образцов из сплава системы *Ni-Fe-Cr*, сформированных методом прямого лазерного выращивания, свидетельствует о зависимости уровня *KCV* от направления роста слоев в объеме материала. При смене ориентации роста слоев от параллельной внешней нагрузке к поперечной, величина ударной вязкости материала возрастает в 1,5 раза. Объясняется это дополнительными затратами энергии на торможение трещины при пересечении ею множества границ зерен. Характер разрушения образцов является вязким с образованием множества ямок. Расположенные в междендритных пространствах мелкие частицы фазы Лавеса могут являться одним из факторов, способствующих зарождению и распространению трещин. Показано, что термическая обработка сплава системы *Ni-Fe-Cr*, способствующая выделению  $\gamma'$ -частиц во всем объеме материала, приводит к полуторакратному росту энергии разрушения материала. Термически обработанный сплав также демонстрирует вязкий характер разрушения, аналогичный материалу после послойной наплавки порошка.

Принимая во внимание повышение уровня ударной вязкости в термически обработанном сплаве системы *Ni-Fe-Cr*, проведение циклических испытаний также было выполнено на образцах, прошедших термическую обработку. Установлено, что скорость распространения усталостной трещины  $dl/dN$  в образцах с поперечной ориентацией роста слоев относительно внешней нагрузки (рисунок 8 а, кривая А) при аналогичном уровне размаха коэффициента интенсивности напряжений  $\Delta K$  выше, чем в образцах, испытанных с приложением нагрузки вдоль роста слоев (рисунок 8 а, кривая В). Изменение скорости разрушения обусловлено преодолением усталостной трещиной многочисленных границ столбчатых дендритов, ориентированных перпендикулярно направлению ее распростра-

нения (рисунок 8 б). Напротив, при приложении нагрузки перпендикулярно росту слоев трещина относительно свободно продвигается в междендритном пространстве, ориентированном параллельно направлению ее развития (рисунок 8 в).

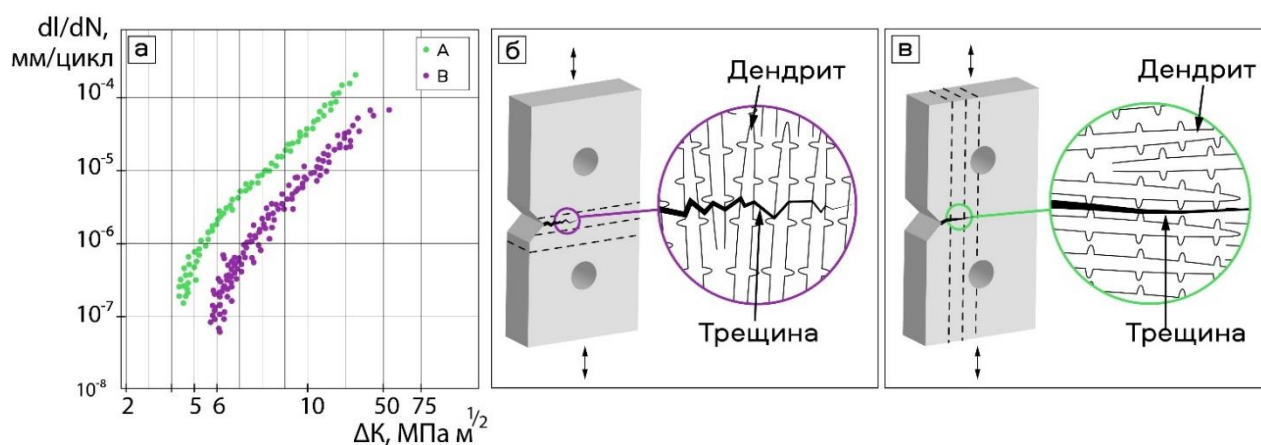


Рисунок 8 – Усталостное разрушение образцов из сплава системы *Ni-Fe-Cr* после лазерной наплавки и термической обработки. а – кинетические диаграммы усталостного разрушения при приложении внешней нагрузки перпендикулярно (кривая *A*) и параллельно (кривая *B*) направлению роста слоев; б – схема распространения трещины с приложением нагрузки параллельно росту слоев; в – схема распространения трещины с приложением нагрузки перпендикулярно росту слоев

Детальное исследование образцов позволяет сделать вывод о преимущественно вязком механизме их разрушения с присутствием зон, в пределах которых прослеживается рельеф бороздчатого типа (рисунок 9 а). В отличие от образцов, испытанных с приложением нагрузки перпендикулярно направлению роста слоев, на изломах образцов с продольной ориентацией слоев наблюдаются вторичные трещины, что свидетельствует о торможении трещины при достижении ею границ столбчатых зерен (рисунок 9 в). Анализ боковых поверхностей разрушения образцов, подвергнутых травлению, свидетельствует о том, что частицы фазы Лавеса и  $\delta$ -фазы после испытаний на малоцикловую усталость находятся в неразрушенном состоянии (рисунок 9 б, г). Это говорит о том, что мелкие частицы фазы Лавеса и смежные с ними пластины  $\delta$ -фазы (см. рисунок 7), распределенные в матрице, упрочненной  $\gamma'$ -фазой, высоких локальных напряжений не вызывают. Распространение магистральной трещины при встрече ее с указанными построениями либо замедляется, либо происходит по механизму огибания препятствия (рисунок 9 д, е).

**В шестой главе работы** представлены рекомендации по практическому использованию процесса аддитивного формирования изделий по схеме прямого подвода энергии и порошкового материала в зону лазерной наплавки. Материалы исследований переданы в Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН для оптимизации аддитивных технологических процессов. Отражено использование результатов диссертационной работы в учебном процессе НГТУ.



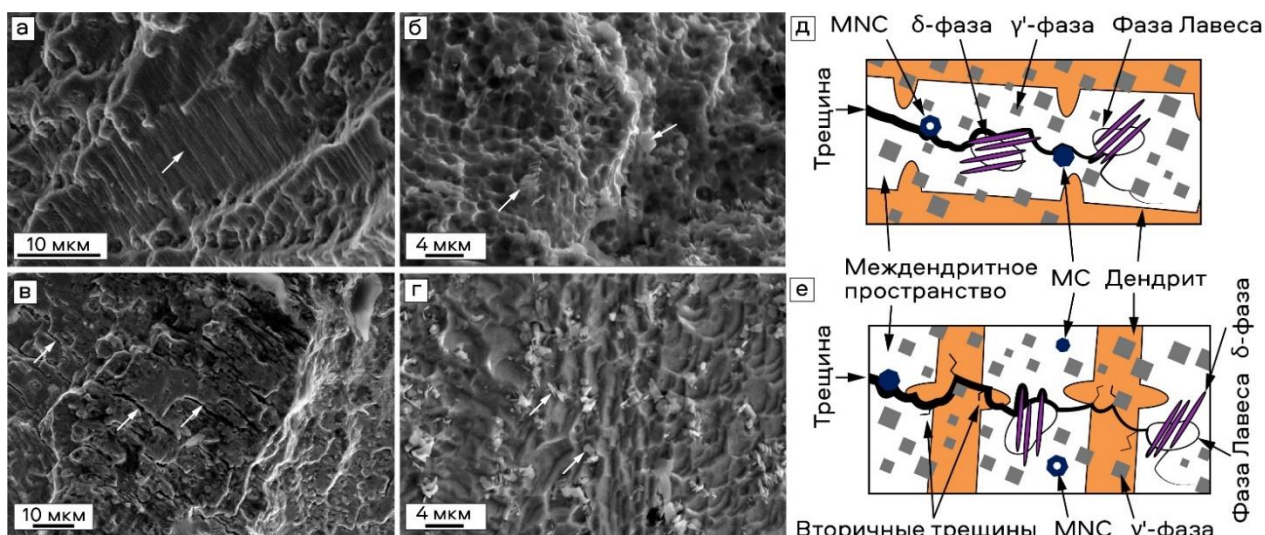


Рисунок 9 – Особенности усталостного разрушения образцов из сплава системы *Ni-Fe-Cr*.  
 а, в – нагружение по схеме с приложением силы вдоль направления роста слоев;  
 б, г – боковые поверхности циклически испытанных образцов вблизи линии разрушения с ориентацией роста слоев перпендикулярно (б) и параллельно (г) приложению силы;  
 д, е – схемы распространения трещины при циклическом нагружении с перпендикулярной (д) и параллельной (е) ориентацией внешней нагрузки относительно направления роста слоев

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Структура никелевых сплавов систем *Ni-Cr-Mo*, *Ni-Co-Cr*, *Ni-Fe-Cr*, полученных по схеме прямой подачи энергии и порошкового материала с размером частиц 60–90 мкм в диапазоне эффективной энергии лазерного излучения 6,7–32 Дж/мм<sup>2</sup> характеризуется отсутствием дефектов в виде трещин. Уровень эффективной энергии до 13,3 Дж/мм<sup>2</sup> при шаге единичного слоя 0,04 мм недостаточен для полного плавления исходного порошкового материала. Структура материалов, соответствующая данному интервалу, характеризуется наличием множества неслитин. При наплавке заготовок из сплавов систем *Ni-Cr-Mo* и *Ni-Co-Cr* с шагом слоя 0,04 мм повышение эффективной энергии от 6,7 до 32 Дж/мм<sup>2</sup> сопровождается четырехкратным снижением пористости материалов (с 3 % до 0,7 %). Пористость никелевого сплава системы *Ni-Fe-Cr*, сформированного с высотой единичного слоя 0,6 мм (при энергии 21,2–23,6 Дж/мм<sup>2</sup>), не превышает 1,1 %. Все полученные в процессе лазерной наплавки «многослойные» материалы характеризуются высоким уровнем когезионной прочности.

2. Экспериментально показано, что тип дендритных построений, формирующихся в ходе аддитивного процесса, тесно коррелирует с уровнем эффективной энергии лазерного излучения и высотой формируемого слоя. «Многослойная» структура никелевого сплава системы *Ni-Fe-Cr*, сформированная в процессе наплавки с шагом слоя 0,6 мм (21,2–23,6 Дж/мм<sup>2</sup>), характеризуется наличием прерывистых столбчатых кристаллов. Микроструктура каждого слоя содержит три зоны - зону столбчатых дендритов, зону сплавления и зону термического влияния.

3. Уменьшение шага слоя до 0,04 мм при наплавке сплавов систем *Ni-Cr-Mo* и *Ni-Co-Cr* (24–32 Дж/мм<sup>2</sup>) приводит к образованию ориентированных в направлении теплового потока протяженных столбчатых дендритов, проходя-

щих через множество слоев. Угол разориентации дендритов при наплавке порошка в интервале 24–26,7 Дж/мм<sup>2</sup> составляет ~ 10 градусов. С ростом эффективной энергии лазерного луча до 32 Дж/мм<sup>2</sup> его величина уменьшается до ~ 7 градусов. При наплавке с энергией лазерного излучения в диапазоне 13,3–16 Дж/мм<sup>2</sup> в структуре сплавов формируются разориентированные дендритные построения. Уровень эффективной энергии лазерного излучения менее 13,3 Дж/мм<sup>2</sup> не достаточен для полного расплавления гранул исходного материала, что способствует разнонаправленному росту дендритов от исходных частиц наплавляемого порошка.

4. Стандартная термическая обработка заготовок из никелевого сплава системы *Ni-Fe-Cr*, включающая отжиг при 980 °C и охлаждение на воздухе в сочетании с последующим двухступенчатым старением при 720 °C и 620 °C сопровождается образованием частиц  $\gamma'$ -фазы *Ni<sub>3</sub>Al*. При этом рекристаллизации матричной фазы не происходит. Выделение упрочняющих  $\gamma'$ -частиц в объеме материала при сохранении его дендритной структуры приводит к двукратному увеличению прочностных характеристик и повышению ударной вязкости в 1,5 раза.

5. Экспериментально выявлены особенности формирования наноразмерных частиц упрочняющей  $\gamma'$ -фазы *Ni<sub>3</sub>Al* при наплавке никелевого сплава системы *Ni-Co-Cr* с шагом слоя 0,04 мм в диапазоне эффективной энергии лазерного излучения 12–32 Дж/мм<sup>2</sup>. Показано, что максимально приближенная к кубу форма частиц  $\gamma'$ -фазы со средним размером 45 нм соответствует эффективной энергии на уровне 24 Дж/мм<sup>2</sup>. Округлые частицы размером 20–40 нм выделяются при наплавке сплавов с уровнем энергии лазерного излучения 12–16 Дж/мм<sup>2</sup>. Формирование частиц сферической формы при увеличении эффективной энергии до 32 Дж/мм<sup>2</sup> обусловлено выделением в междендритных пространствах большего количества первичных карбидов и перераспределением  $\gamma'$ -образующих элементов.

6. Методами просвечивающей электронной микроскопии и дифракции электронов на границах зерен сплава системы *Ni-Cr-Mo* зафиксировано формирование частиц  $\delta$ -фазы пластинчатой морфологии. Длина отдельных частиц, выделившихся в процессе прямого лазерного выращивания при эффективной энергии лазерного излучения 6,7 Дж/мм<sup>2</sup>, не превышает 200 нм. При наплавке с энергией 20–26,7 Дж/мм<sup>2</sup> длина пластин возрастает до ~ 500 нм. Формирования выделений  $\delta$ -фазы игольчатой морфологии, снижающих комплекс механических свойств материалов, не выявлено.

7. Показано, что одним из основных факторов, определяющих характер перераспределения элементов и конечную структуру сплава системы *Ni-Fe-Cr*, является процесс выделения устойчивых к высокотемпературному нагреву карбонитридов (*Nb, Ti*)NC, которые удерживают значительную долю ниобия, необходимого для формирования основной для данного сплава упрочняющей  $\gamma''$ -фазы (*Ni<sub>3</sub>Nb*).

8. Многочисленные границы дендритных построений, ориентированные перпендикулярно направлению распространения трещины, представляют

собой эффективные структурные барьеры, приводящие к дополнительным затратам энергии, необходимой для разрушения материалов. На примере сплава системы *Ni-Fe-Cr* показано, что, в отличие от границ раздела смежных дендритов, границы раздела между последовательно наплавленными слоями не являются факторами, способствующими торможению трещин, развивающихся в условиях циклического и динамического нагружения.

9. Присутствие частиц  $\gamma'$ -фазы в термически обработанном сплаве системы *Ni-Fe-Cr*, полученном методом прямого лазерного выращивания, не приводит к формированию высоких локальных напряжений вблизи частиц фазы Лавеса и смежных с ними выделений  $\delta$ -фазы. При встрече с указанными построениями магистральная трещина либо тормозится, либо продвигается в материале по механизму огибания препятствий.

10. Полученные в ходе выполнения диссертационной работы данные используются в лекционных курсах, практических и лабораторных работах при реализации образовательных программ бакалавриата по направлению 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов» по дисциплинам «Технология конструкционных материалов» и «Физические методы исследования материалов». Экспериментальные данные, полученные при оценке структуры послойно наплавленных никелевых сплавов, переданы в Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН для практического использования при оптимизации технологических режимов аддитивного производства по схеме прямой подачи энергии (лазера) и порошкового материала.

#### **Перспективы дальнейшей разработки темы**

К перспективным направлениям развития тематики диссертационной работы относятся изучение влияния скорости сканирования (перемещения рабочего инструмента) на структуру и комплекс механических свойств никелевых сплавов, полученных с использованием аддитивного метода прямого лазерного выращивания.

### **СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

#### Статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих в список ВАК:

1. **Рашковец М.В.** Исследование фазового состава никелевого сплава *Inconel* 718, полученного аддитивной технологией / **М.В. Рашковец**, А.А. Никулина, О.Г. Климова-Корсмик, К.Д. Бабкин, О.Э. Матц, М. Маццаризи // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2020. – Том 22. – № 3. – С. 69–81.

2. **Рашковец М.В.** Влияние термической обработки на структурно-фазовое состояние и ударную вязкость никелевого сплава *Inconel* 718 при аддитивном производстве / **М.В. Рашковец**, Н.Г. Кислов, А.А. Никулина, О.Г. Климова-Корсмик // *Фотоника*. – 2021. – Том 12. – № 7. – С. 568–575.

#### Статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных

#### Web of Science / Scopus:

3. **Rashkovets M.** *Microstructure and Phase Composition of Ni-Based Alloy Obtained by High-Speed Direct Laser Deposition* / **M. Rashkovets**, **A. Nikulina**, **G. Turichin**, **O. Klimova-Korsmik**, **M. Sklyar** // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2018. – Vol. 27. – iss.12. – P. 6398–6406.

4. **Rashkovets M.** Analysis of laser direct stainless-steel powder deposition on Ti6Al4V substrate / M. Rashkovets, M. Mazzarisi, A. Nikulina, G. Casalino // *Materials Letters*. – 2020. – Vol. 274. – Art. 128064 (4 p.).

5. **Rashkovets M.V.** Characterization of Ni-Cr-Mo alloy phase structures under DLD process / M.V. Rashkovets, A.A. Nikulina, O.G. Klimova-Korsmik, A.I. Smirnov, S.V. Veselov, N.G. Kislov // *IOP Conference Series: Journal of Physics*. – 2021. – Vol. 2077. – iss. 1. – Art. 012015 (5 p.).

6. **Rashkovets M.V.** Gradient microstructure, mechanical properties and phase composition of Ni-Cr-Fe alloy under additive manufacturing process / M.V. Rashkovets, A.A. Nikulina, O.G. Klimova-Korsmik, N.G. Kislov, O.E. Matts // *AIP Conference Proceedings: International Conference on Physical Mesomechanics. Materials with Multi-level Hierarchical Structure and Intelligent Manufacturing Technology*. – 2020. – Vol. 2310. – iss. 1. – Art. 020273 (5 p.).

7. Alekseev A. V. Simulation of the Ni<sub>3</sub>Al intermetallic inclusion growth process during direct laser deposition using Ni-based superalloy powder / A.V. Alekseev, G.A. Turichin, O.G. Klimova-Korsmik, E.A. Valdaytseva, **M.V. Rashkovets** // *Materials Today: Proceedings*. – 2020. – Vol. 30. – P. 756–760.

8. Turichin G. A. Comparative analysis of the gamma prime phase formation in nickel alloys in additive manufacturing / G.A. Turichin, O.G. Klimova-Korsmik, E.A. Valdaytseva, A.V. Alekseev, **M.V. Rashkovets** // *Procedia CIRP*. – 2020. – Vol. 94. – P. 320–323.

9. **Rashkovets M.** Structure and phase composition of a Ni-based alloy formed by additive manufacturing / M. Rashkovets, A. Nikulina, P. Ryabinkina // *Materials Today: Proceedings*. – 2019. – Vol. 12. – P. 124–127.

10. **Rashkovets M.** High-Speed Direct Laser Deposition of 51Ni-14Co-10Cr-6Al-5Mo Alloy: Microstructure and Phase composition / M. Rashkovets, A. Nikulina, O. Klimova-Korsmik // *Materials Today: Proceedings*. — 2019. – Vol. 11. – P. 144–149.

#### Материалы конференций:

11. **Рашковец М.В.** Получение жаропрочного никелевого сплава аддитивной технологией высокоскоростного прямого лазерного выращивания / **М.В. Рашковец**, А.А. Никулина, А.А. Ляпунова // *Актуальные проблемы в машиностроении: тезисы докладов VII Международной научно-практической конференции* – Новосибирск, 28 марта 2018 г. – Т. 5. – № 3–4. – С. 118–123.

12. **Рашковец М.В.** Механические свойства и структура сплава 55Ni-17Cr-5Fe-3Mo при аддитивном производстве / М.В. Рашковец, А.А. Никулина, О.Г. Климова-Корсмик, Н.Г. Кислов, О.Э. Матц // *Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии: тезисы докладов VII Международной научно-практической конференции* – Томск, 5–9 октября 2020 г. – С. 565–566.

Отпечатано в типографии Новосибирского  
государственного технического университета  
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,  
Тел./факс: (383)346-08-57  
формат 60×84 1/16, объем 1,25 п.л., тираж 100 экз.  
заказ № 866 подписано в печать 05.04. 2022 г.