

На правах рукописи



Хакимов Алексей Мунирович

**«СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА ХН50ВМТЮБ
ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ДЕТАЛЕЙ ГТД ПО
АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО НАНЕСЕНИЯ
МЕТАЛЛОВ»**

Специальность 2.6.17. Материаловедение

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара – 2022

Работа выполнена на кафедре «Литейные и высокоэффективные технологии» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет»

Научный руководитель:

Никитин Константин Владимирович, доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Хаймович Александр Исаакович, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Технологии производства двигателей» ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»

Корзникова Галия Фердинандовна, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник ФГБУН «Институт проблем сверхпластичности металлов Российской академии наук»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет»

Защита диссертации состоится «2» декабря 2022 г. в 15:30 часов на заседании объединенного диссертационного совета 99.2.039.02 (Д999.122.02) при ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет им. Академика С.П. Королева» по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, главный корпус, аудитория 200.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет», с авторефератом — на сайте:

http://d99912202.samgtu.ru/sites/d99912202.samgtu.ru/files/hakimov_diss.pdf

Отзывы на реферат просим выслать в двух экземплярах, заверенных печатью, по адресу: Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Самарский государственный технический университет, Главный корпус, учёному секретарю диссертационного совета 99.2.039.02 (Д999.122.02).

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

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



А.Р. Луц

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы: Для изготовления деталей сборочных единиц газотурбинных двигателей (ГТД) авиационного назначения широко применяются жаростойкие и жаропрочные сплавы на основе никеля, которые составляют порядка 50 % от его массы. Данные сплавы в авиационном двигателестроении обычно работают на пределе своих температурных возможностей, так как рабочие температуры часто достигают 0,8...0,85% от их температуры плавления. Современные жаропрочные сплавы на основе никеля – это сложнолегированные материалы: в их состав входит до семи - девяти основных легирующих элементов: Mo, W, Cr, V, Nb, Co, Al, Fe, Cu и Ti. Титан и алюминий (суммарно до 8...10 %) образуют главную упрочняющую фазу – γ' . Хром и алюминий повышают сопротивление к газовой коррозии.

Детальями ГТД из жаропрочных сплавов на основе никеля являются диски, сопловые и рабочие лопатки турбины, элементы камеры сгорания и т.д. Наиболее распространены сплавы ХН60ВТ (ВЖ98, ЭИ868), ХН50ВМТЮБ (ЭП648), ХН68ВМТЮК (ЭП693), ХН56ВМТЮ (ЭП199) и др.

Одними из основных проблем в производстве крупногабаритных корпусных деталей ГТД традиционными способами являются разнотекстурность и анизотропия свойств материала, получаемые в результате применения различных технологий изготовления, например, литья, проката и сварки.

В связи с этим все большую актуальность приобретают задачи, связанные с внедрением аддитивных процессов в производство крупногабаритных деталей и обеспечением требуемой структуры и уровня свойств материала.

Данное направление в полной мере соответствует приоритетным направлениям стратегии научно-технологического развития Российской Федерации до 2035 года и стратегии развития аддитивных технологий в Российской Федерации на период до 2030 года. Работа выполнена в рамках проекта «Аддитивные технологии в АО «ОДК», направленного на реализацию стратегической задачи по сокращению сроков разработки, стоимости освоения и вывода на глобальный рынок высокотехнологичной, конкурентоспособной продукции.

Основная часть экспериментальных исследований и испытаний выполнена на базе ФГБОУ ВО «СамГТУ». Прецизионные исследования выполнялись на базе центральных заводских лабораторий предприятий АО «ОДК». Опытная промышленная апробация производилась в филиале АО «ОДК» «НИИД».

Целью работы является исследование структуры и свойств жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ, полученного по аддитивной технологии прямого лазерного нанесения, с целью обеспечения требуемых эксплуатационных характеристик крупногабаритных деталей.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе были поставлены следующие **основные задачи**:

1. Выполнить исследования исходных металлопорошковых композиций (МПК): фракционный состав, морфологический анализ, анализ макро- и микроструктуры, анализ химического состава;

2. Исследовать влияние режимов прямого лазерного нанесения и термической обработки на структуру и свойства жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ;

3. Разработать параметры прямого лазерного нанесения, обеспечивающие требуемые структуру и свойства крупногабаритных корпусных деталей;

4. Провести опытно-промышленную апробацию технологии изготовления крупногабаритной корпусной детали ГТД «Корпус».

Научная новизна диссертационной работы:

1. Впервые установлено влияние мощности лазерного излучения и скорости прямого лазерного нанесения на размеры и количество дефектов жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ, полученного по аддитивной технологии прямого лазерного нанесения;

2. Установлены закономерности формирования структуры и свойств наплавленных слоев жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ при воздействии лазерного излучения;

3. Впервые выявлено влияние режимов прямого лазерного нанесения на однородность структуры и механических свойств жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ;

4. На основании установленных зависимостей, определен оптимальный режим прямого лазерного нанесения ($P_{\text{ли}} = 1000$ Вт; $v_{\text{напл}} = 20$ мм/с), обеспечивающий минимальное количество дефектов структуры и требуемый уровень механических свойств.

Практическая значимость работы:

1. Установлено положительное влияние термической обработки на структуру и свойства образцов из жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ, полученных по аддитивной технологии прямого лазерного нанесения. Подобранный термическая обработка позволила снять внутренние напряжения и избавиться от трещинообразования в процессе механической обработки;

2. Разработан маршрутно-технологический процесс изготовления заготовки детали «Корпус» из жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ по аддитивной технологии прямого лазерного нанесения;

3. Разработана технология изготовления прямого лазерного нанесения, по которой получена опытная крупногабаритная заготовка детали «Корпус» для перспективного ГТД, прошедшая опытно-промышленную апробацию.

Методы исследования и достоверность научных результатов:

Для реализации поставленных целей и задач в работе применялись современные методы электронно-микроскопического и элементного анализов, стандартные методики измерения микротвёрдости и проведения механических испытаний с применением современного аттестованного оборудования центральных заводских лабораторий предприятия ПАО «ОДК-Кузнецов»,

производственного комплекса «Салют» АО «ОДК» и оборудования научных лабораторий ФГБОУ ВО «СамГТУ».

Достоверность полученных результатов в работе подтверждается использованием известных положений фундаментальных наук, хорошей согласованностью полученных теоретических результатов с результатами экспериментальных данных, а также с результатами исследований других авторов.

Объект исследования: в качестве объекта исследования был выбран жаропрочный стареющий свариваемый никель-хромовый сплав ХН50ВМТЮБ, применяемый для сварных конструкций, длительно работающих в агрессивных газовых средах при температурах до 1100 °С.

Предмет исследования: возможность применения в аддитивной технологии прямого лазерного нанесения жаропрочного стареющего свариваемого никель-хромового сплава ХН50ВМТЮБ, структура и свойства полученного материала.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты сравнительного исследования структуры и свойств исходных МПК, полученных различными способами;

2. Результаты исследований влияния режимов прямого лазерного нанесения и термической обработки на структуру и свойства жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ;

3. Параметры прямого лазерного нанесения, обеспечивающие требованиям по структуре и свойствам материала, предъявляемым к крупногабаритным корпусным деталям и результаты опытно-промышленной апробации технологии изготовления крупногабаритной корпусной заготовки детали перспективного ГТД «Корпус».

Личный вклад автора заключается в следующем: формирование целей и задач исследований; проведение экспериментальных исследований; разработка маршрутно-технологического процесса прямого лазерного нанесения для изготовления заготовки детали «Корпус» из жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ; изготовление опытной заготовки детали «Корпус».

Публикации: По теме диссертационной работы опубликовано 10 научных работ, в том числе: 2 работы опубликованы в изданиях, входящих в базу международного цитирования Scopus и Web of Science; 5 работ, опубликованы в изданиях, входящих в перечень рецензируемых журналов ВАК РФ, 3 работы, опубликовано в прочих изданиях.

Апробация работы и основные достижения: Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на следующих научно-технических мероприятиях: 8-я Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Наследственность в литейно-металлургических процессах» (Самара, 2018); 5-ая Международная научная конференция перспективных разработок молодых ученых «Наука молодых – будущее России» (Курск, 2020); 9-ая Международная научно-практическая конференция

«Современные материалы, техника и технология» (Курск, 2020); Международная конференция APITECH-III-2021 (Красноярск, 2021).

Значимые достижения по результатам диссертационной работы:

1. Диплом победителя областного конкурса с присуждением гранта «Молодой ученый» (Самара, 2017);
2. Диплом TimePad участника всероссийской конференции «3D-технологии для бизнеса» (Тольятти, 2018);
3. Грамота за создание новой технологии «Авиастроитель года», (Жуковский, 2019).

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, показана новизна и практическая значимость работы, изложена методология и методика исследований, сформулированы положения, выносимые на защиту, подтверждена достоверность результатов работы, указан личный вклад автора в выполненные в работе исследования.

В первой главе выявлены требования к структуре и свойствам материала, рассмотрены методы получения МПК, традиционные и аддитивные технологии получения металломатричных материалов.

Во второй главе описаны материалы, методы и методики исследований. Изложены методические особенности исследования параметров качества исходной МПК, структуры и свойств материала из жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ, полученного аддитивной технологией прямого лазерного нанесения, проведения термической обработки и изготовления опытной заготовки детали «Корпус» выходного устройства перспективного изделия.

В третьей главе исследованы исходные МПК из жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ двух производителей: ФГУП «ВИАМ» (газовая атомизация) и АО «Композит» (центробежное распыление). Выбранные МПК имеют размеры частиц 40-150 мкм.

Качество исходного материала является ключевым фактором для получения бездефектной структуры деталей с требуемым уровнем свойств. При прямом лазерном нанесении может проявляться наследственность, заключающаяся в переносе дефектов из исходных МПК в материал изготавливаемой детали.

Частицы МПК из жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ производства ФГУП «ВИАМ», полученной по технологии газовой атомизации, имеют преимущественно сферическую и округлую формы, отмечается наличие многочисленных частиц брызгообразных форм, до 4 шт/см² (рисунок 1 в)). На поверхности всех частиц присутствуют сателлиты, размерами 1-2 мкм (рисунок 1 а) - д)). В сечении многих частиц обнаружены округлые поры размером до 50 мкм (рисунок 1 д), е)). Структура порошка имеет дендритное строение. Дендриты ориентированы в различных направлениях, ширина осей дендритов не превышает 1 мкм (рисунок 1 д), е)).

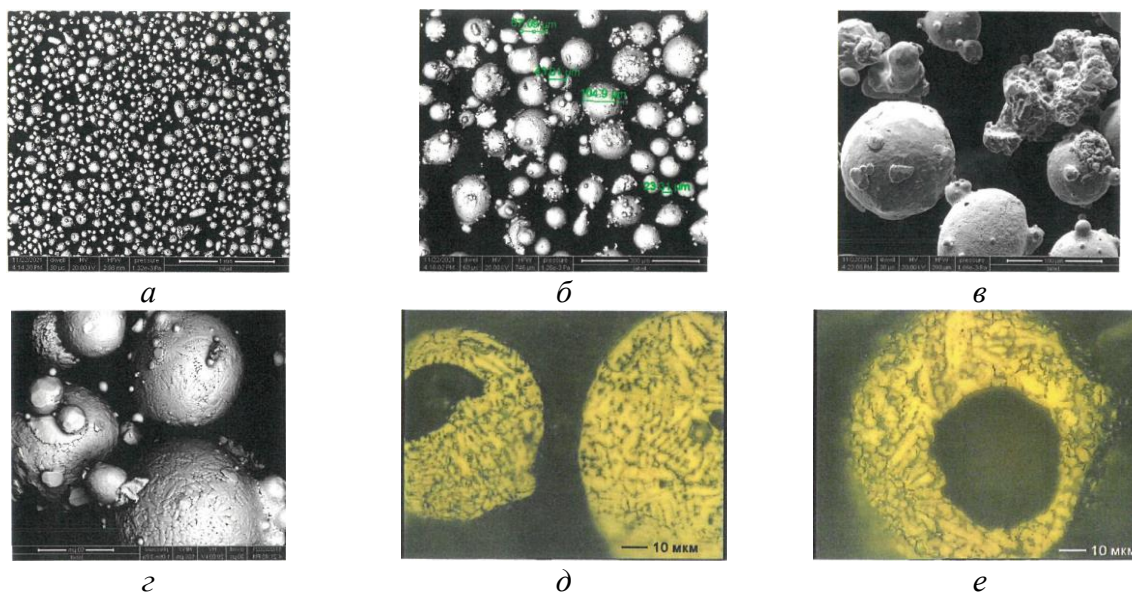


Рисунок 1 - Морфология частиц МПК из жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ производства ФГУП «ВИАМ»: а) - г) – поверхность частиц 2; д) - е) срез частиц

Микроспектральный анализ химического состава показал полное его соответствие предъявляемым требованиям.

В связи с обнаружением многочисленных пор на срезе частиц МПК из жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ производства ФГУП «ВИАМ» были изготовлены опытные образцы посредством прямого лазерного нанесения и последующим исследованием их структуры (рисунок 2).

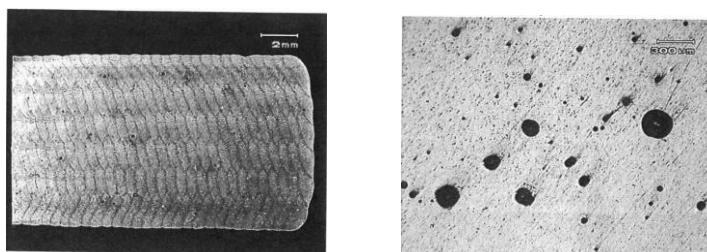


Рисунок 2 – Структура изготовленного образца из жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ производства ФГУП «ВИАМ» по аддитивной технологии прямого лазерного нанесения

При исследовании структуры изготовленного образца выявлено многочисленное содержание пор до 11шт/см² и максимальным размером до 150 мкм, образующихся в результате переноса из исходной МПК.

Анализируя полученные данные, МПК из жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ производства ФГУП «ВИАМ» не рекомендована для проведения дальнейших исследований.

Для набора статистики, исследование качества МПК из жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ производства АО «Композит», полученной по технологии центробежного распыления, проведено на 5 партиях.

Для обеспечения стабильности режимов прямого лазерного нанесения плюсовая фракция должна быть не более 5%, а минусовая не более 10%, что изначально было заложено в технических условиях ТУ 136-225-2019 и

требованиях к материалам, применяемым в гибридном комплексе ГК-01. Также, МПК должна обладать текучестью для бесперебойной подачи по транспортирующим каналам в зону роста. Дополнительно, для более общего исследования качества МПК были выполнены работы по замеру текучести, насыпной плотности и влажности. По результатам замеров выявлено (таблица 1), что все исследуемые партии МПК соответствуют предъявляемым требованиям, а текучесть в 2 раза лучше предъявляемых требований.

Таблица 1 – Результаты исследований МПК из жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ производства АО «Композит»

№ партии МПК	Гранулометрический состав, %		Текучесть, сек	Насыпная плотность, г/см ³	Влажность, %
	плюсовая фракция (более 150 мкм)	минусовая фракция (менее 40 мкм)			
1	отсутствует	4	14,6	4,9	0,001
2	0,5	3,9	14,5	4,91	0,04
3	1,8	3,5	14,6	4,94	0,03
4	3,9	3,0	14,7	4,91	0,04
5	0,4	0,3	14,5	4,87	0,04
По ТУ 136-225-2019	не более 5 %	не более 10 %	≤27,5	4,96±10%	≤0,1

С целью исключения попадания посторонних включений в получаемый по технологии прямого лазерного нанесения материал, был выполнен визуальный контроль включений в МПК, в процессе ситового анализа путем осмотра остатка на сетке без применения увеличительных приборов. Посторонних включений в МПК не обнаружено.

Оценка морфологии частиц МПК показала, что все исследуемые партии имеют сферические частицы, что подтверждается полученными значениями текучести. В партиях №3 и №5 встречается незначительное содержание округлых, стержневых и брызгообразных форм. В партии №3 - до 2шт/см² округлых частиц, в партии №5 - до 1шт/см² частиц со стержневой формой и до 2шт/см² частиц с брызгообразной формой.

При исследовании среза частиц, внутренних дефектов не обнаружено. Частицы, как на поверхности, так и на срезе имеют дендритную структуру (рисунок 3).

Химический состав всех партий МПК соответствует предъявляемым требованиям. При анализе карт распределения химических элементов на частицах МПК из жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ, выявлено, что во всех частицах наблюдается равномерное распределение фазовых составляющих.

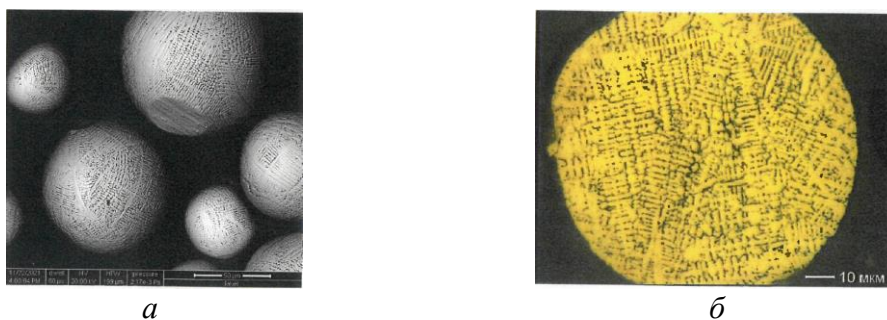


Рисунок 3 – Структура частиц МПК из жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ производства АО «Композит»: а) на поверхности частиц; б) на сечении частицы

Анализируя полученные результаты, можно с уверенностью утверждать, что МПК из жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ производства АО «Композит» соответствует всем предъявляемым требованиям и превосходит по качеству МПК из жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ производства ФГУП «ВИАМ». При изготовлении деталей прямым лазерным нанесением, учитывая наследственность материала, в структуре деталей будет отсутствовать пористость, переносимая из МПК. Также получаемый материал деталей будет иметь равномерное распределение химических элементов в объеме.

В четвертой главе исследовано влияние процесса прямого лазерного нанесения и термической обработки на структуру и свойства образцов из жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ. Изготовление образцов для исследований структуры и свойств материала производилось на режимах прямого лазерного нанесения, подобранных опытным путем, указанных в таблице 2.

Таблица 2 – Режимы прямого лазерного нанесения

Параметр режима лазерного нанесения	Значение параметра прямого лазерного нанесения							
	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7	№8
Мощность $P_{ли}$, Вт	1000	1200	1400	1600	1000	1200	1400	1600
Диаметр пятна лазера d , мм	2,7							
Расход транспортирующего газа C , л/мин	10							
Расход МПК, г/мин	35	33	30	29	35	33	30	29
Скорость наплавки v , мм/сек	20							
Шаг слоя z , мм	0,4							
Расстояние между центрами валиков h , мм	1,6				1,4			

На образцах №4 и №8, изготавливаемых с $P_{ли}=1600$ Вт выявлено нестабильное формирование поверхностей, связанное с перегревом и окислением металла.

Металлографические исследования проводились на образцах изготовленных из заготовок образцов с размерами 60x15x25мм. Схема вырезки образцов представлена на рисунке 4.

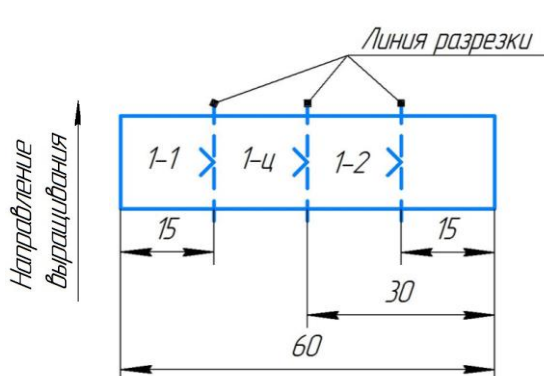


Рисунок 4 – Схема вырезки образцов для металлографических исследований (на примере образца №1)

Макроструктура материала всех образцов имеет слоистое строение, внутри слоя строение «чешуйчатое», свойственное для материала, полученного по аддитивной технологии прямого лазерного нанесения. В макроструктуре всех образцов наблюдаются вытянутые зерна.

При макроанализе выявлена зависимость размера зерен от мощности лазерного излучения и расстояния между центрами наплавляемых валиков (рисунок 5): с увеличением мощности лазерного излучения, а также и с уменьшением расстояния между центрами валиков (увеличения перекрытия) увеличиваются размеры зерен. Данные явления связаны с увеличением нагрева, изготавливаемого по технологии прямого лазерного нанесения, материала и уменьшением скорости его охлаждения, способствующим росту зерен.

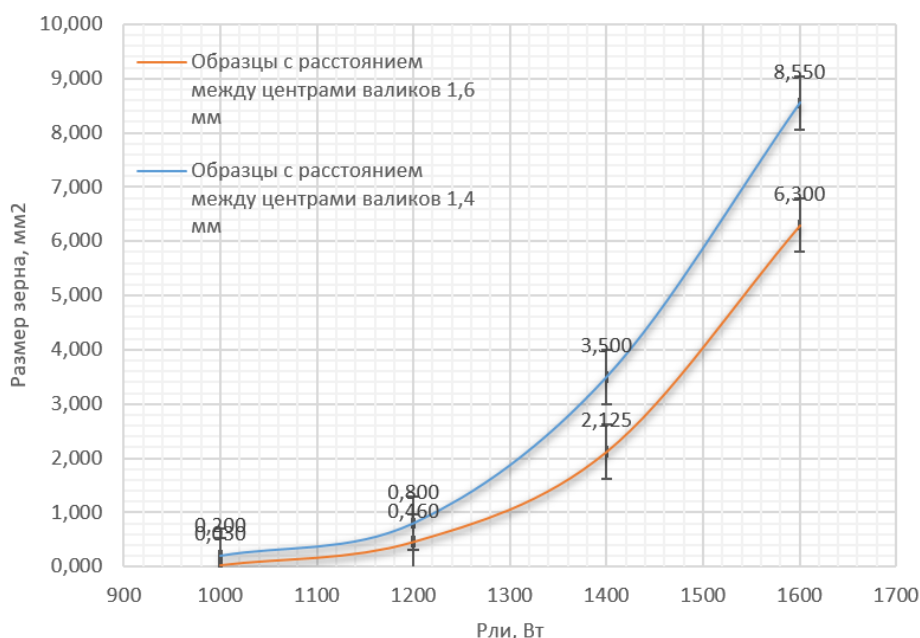
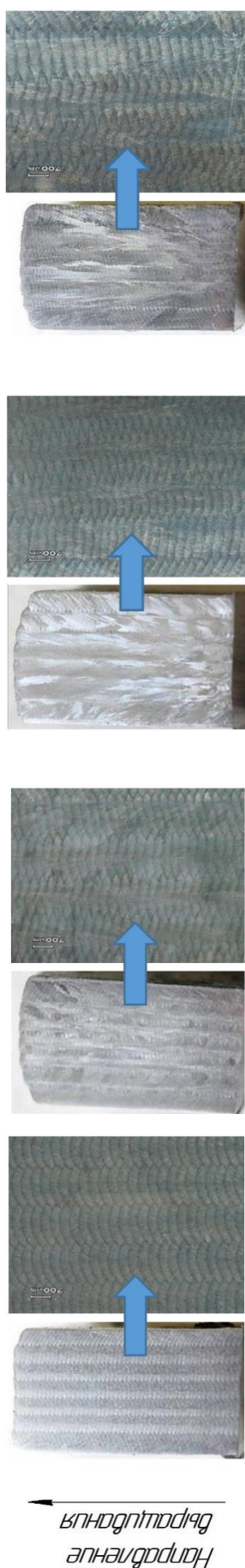


Рисунок 5 – График зависимости размера зерен от мощности лазерного излучения

При микроанализе шлифов установлено, что структура материала всех образцов имеет дендритное строение и характерна для литого состояния материала. Результаты микроанализа представлены на рисунках 6-8.



а) режим №1,
 $P_{\text{ли}} = 1000\text{Вт}$,
 $h = 1,6\text{ мм}$

б) режим №2,
 $P_{\text{ли}} = 1200\text{Вт}$,
 $h = 1,6\text{ мм}$

в) режим №3,
 $P_{\text{ли}} = 1400\text{Вт}$,
 $h = 1,6\text{ мм}$

г) режим №4,
 $P_{\text{ли}} = 1600\text{Вт}$,
 $h = 1,6\text{ мм}$

д) режим №5,
 $P_{\text{ли}} = 1000\text{Вт}$,
 $h = 1,4\text{ мм}$

е) режим №6,
 $P_{\text{ли}} = 1200\text{Вт}$,
 $h = 1,4\text{ мм}$

ж) режим №7,
 $P_{\text{ли}} = 1400\text{Вт}$,
 $h = 1,4\text{ мм}$

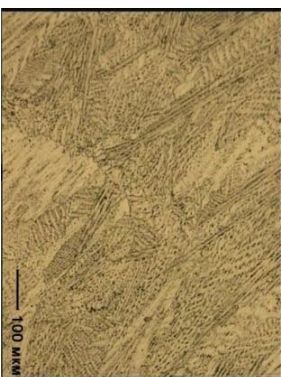
з) режим №8,
 $P_{\text{ли}} = 1600\text{Вт}$,
 $h = 1,4\text{ мм}$

Рисунок 6 - Макроструктура образцов, полученных по аддитивной технологии прямого лазерного нанесения металлов из жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ

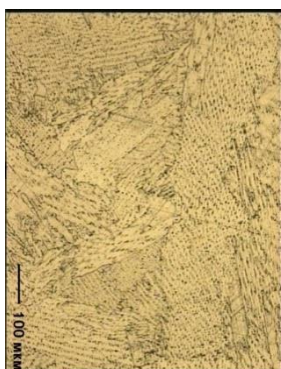
Направление
вырацовывания



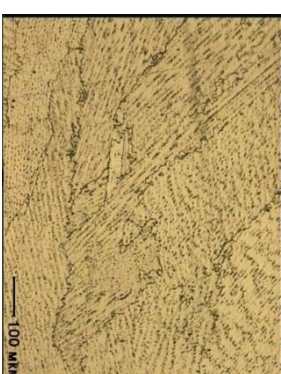

а) режим №1,
 $R_{\text{ли}} = 1000 \text{ Вт}$,
 $h = 1,6 \text{ мм}$



б) режим №2,
 $R_{\text{ли}} = 1200 \text{ Вт}$,
 $h = 1,6 \text{ мм}$

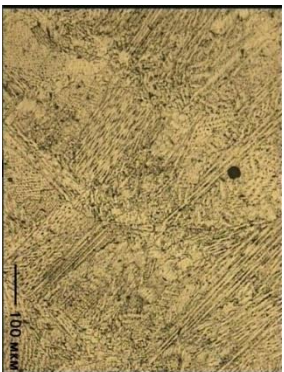


в) режим №3,
 $R_{\text{ли}} = 1400 \text{ Вт}$,
 $h = 1,6 \text{ мм}$



г) режим №4,
 $R_{\text{ли}} = 1600 \text{ Вт}$,
 $h = 1,6 \text{ мм}$

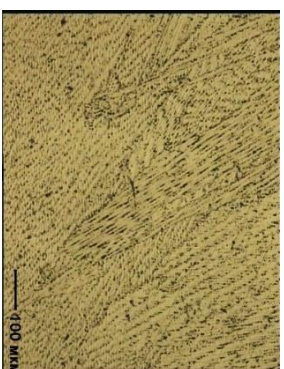
Направление
вырацовывания

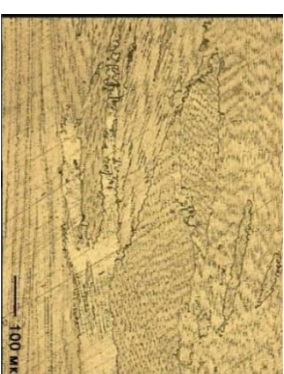
д) режим №5,
 $R_{\text{ли}} = 1000 \text{ Вт}$,
 $h = 1,4 \text{ мм}$



е) режим №6,
 $R_{\text{ли}} = 1200 \text{ Вт}$,
 $h = 1,4 \text{ мм}$



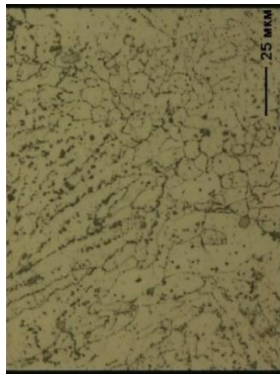
ж) режим №7,
 $R_{\text{ли}} = 1400 \text{ Вт}$,
 $h = 1,4 \text{ мм}$



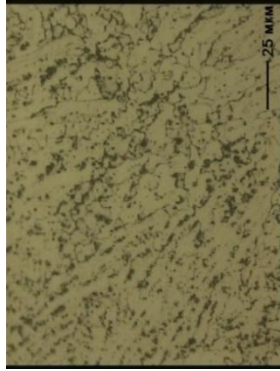
з) режим №8,
 $R_{\text{ли}} = 1600 \text{ Вт}$,
 $h = 1,4 \text{ мм}$

Рисунок 7 - Микроструктура образцов, полученных по аддитивной технологии прямого лазерного нанесения металлов из жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ

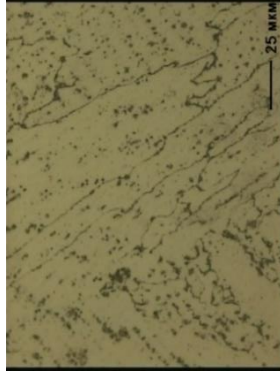
Направление
выращивания



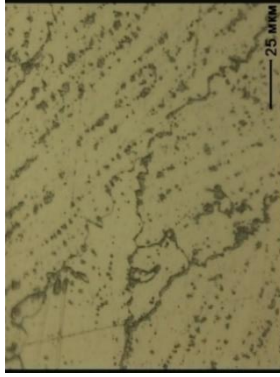
а) режим №1,
 $P_{\text{ли}} = 1000 \text{ Вт}$,
 $h = 1,6 \text{ мм}$



б) режим №2,
 $P_{\text{ли}} = 1200 \text{ Вт}$,
 $h = 1,6 \text{ мм}$

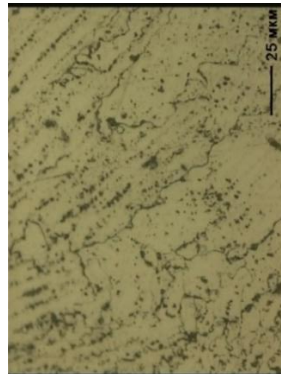


в) режим №3,
 $P_{\text{ли}} = 1400 \text{ Вт}$,
 $h = 1,6 \text{ мм}$

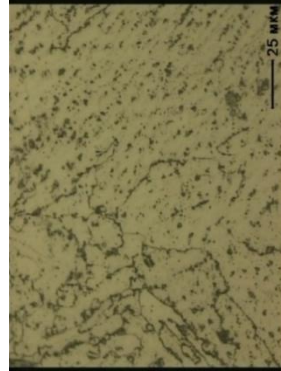


г) режим №4,
 $P_{\text{ли}} = 1600 \text{ Вт}$,
 $h = 1,6 \text{ мм}$

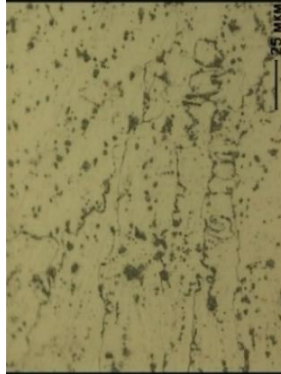
Направление
выращивания



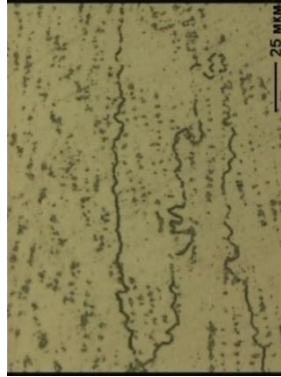
д) режим №5,
 $P_{\text{ли}} = 1000 \text{ Вт}$,
 $h = 1,4 \text{ мм}$



е) режим №6,
 $P_{\text{ли}} = 1200 \text{ Вт}$,
 $h = 1,4 \text{ мм}$



ж) режим №7,
 $P_{\text{ли}} = 1400 \text{ Вт}$,
 $h = 1,4 \text{ мм}$



з) режим №8,
 $P_{\text{ли}} = 1600 \text{ Вт}$,
 $h = 1,4 \text{ мм}$

Рисунок 8 - Микроструктура образцов, полученных по аддитивной технологии прямого лазерного нанесения металлов из жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ

В образце №1 наблюдается мелкая пористость в виде строчек длиной до 0,2 мм, из-за недостаточного перекрытия валиков (рисунок 9).



Рисунок 9 - Мелкие поры, выстроившиеся в строчки в материале образца №1, $P_{\text{ли}} = 1000$ Вт, $h = 1,6$ мм

Максимальный размер единичных дефектов, обнаруженных в материале образцов, представлен в таблице 3.

Таблица 3 - Размеры дефектов в образцах, изготовленных по аддитивной технологии прямого лазерного нанесения

№ образца	Р _{ли} , Вт	h, мм	Сечение	Максимальный размер дефекта, мм			Микро-твердость, HV _{0,1/5} , МПа
				рыхлота	пора, Ø	несплавление (длина)	
1	1000	1,6	1-1	-	0,04	-	301...304
			1-ц	-	0,05	0,04; 0,13	
			1-2	0,06x0,07	0,03; 0,045	-	
2	1200		2-1	-	0,028; 0,05	0,1	301...325
			2-ц	-	0,023	0,09	
			2-2	-	0,028	0,4	
3	1400		3-1	-	0,045	-	293...309
			3-ц	-	0,015	-	
			3-2	0,006x0,029	0,015	-	
4	1600		4-1	0	0,015	0,03...0,08	283...317
			4-ц	0,04x0,016	0,015	-	
			4-2	-	0,05	0,16	
5	1000	5-1	-	0,025	0,02	286...301	
		5-ц	-	0,03...0,04	0,03		
		5-2	-	0,02...0,05	0,02...0,08		
6	1200	6-1	-	0,019	0,045	286...325	
		6-ц	-	0,018	0,053		
		6-2	0,046...0,051	0,04	0,086		
7	1400	7-1	-	0,012	0,04	272...293	
		7-ц	-	0,03	0,02...0,17		
		7-2	-	0,014	0,04		
8	1600			-	0,03	-	259...286

После травления во всех образцах были обнаружены трещины длиной 0,05...1,1мм, расположенные по границам отдельных зерен на расстоянии 0,6...2,0мм от боковых поверхностей (рисунок 10).

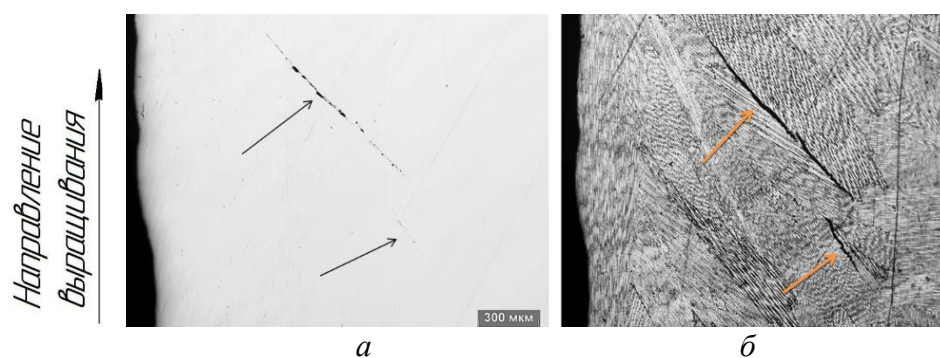


Рисунок 10 - Трещины в образце №8, $P_{\text{ли}} = 1600 \text{ Вт}$, $h = 1,4 \text{ мм}$:
 а) без травления; б) после травления

С целью определения причины возникновения трещин, был проведен микроспектральный анализ. Анализ, показал, что в трещинах содержится повышенное количество кислорода, свидетельствующее о наличии окислов. Окислы образовались в результате перегрева металла за счет избыточного тепловложения и его охлаждения вне зоны локальной защиты инертным газом - аргоном в процессе прямого лазерного нанесения.

Микротвердость образцов практически на одном уровне. Наблюдается незначительное снижение твердости на образцах, полученных прямым лазерным нанесением с мощностью лазерного излучения 1400Вт и 1600Вт.

Для проведения термической обработки были отобраны режимы прямого лазерного нанесения с наименьшим количеством дефектов - №5-8 (таблица №3).

Термообработка образцов для снятия напряжений проводилась в муфельной печи по режиму: закалка $1180 \pm 10^\circ \text{C}$, 4ч., охлаждение на воздухе.

При макроанализе полированных шлифов термически обработанных образцов, дефектов не обнаружено. Аналогично образцам до термической обработки, выявлено увеличение размера зерна от мощности лазерного излучения. Также выявлен рост зерен после выполнения термической обработки по сравнению с образцами до термической обработки. График сравнения размера зерен до и после термической обработки представлен на рисунке 11.

Микроструктура по ширине термически обработанных образцов представлена на рисунке 12. При микроанализе шлифов установлено, что в материале всех образцов имеются дефекты аналогичные обнаруженным до термической обработки. После травления в одном сечении в центральной зоне образца №8 обнаружены тонкие трещины длиной 0,39 мм, 0,4 мм и 0,98 мм, расположенные по границам зерен вдоль направления роста образца (рисунок 12 з)). На остальных образцах трещин не обнаружено.

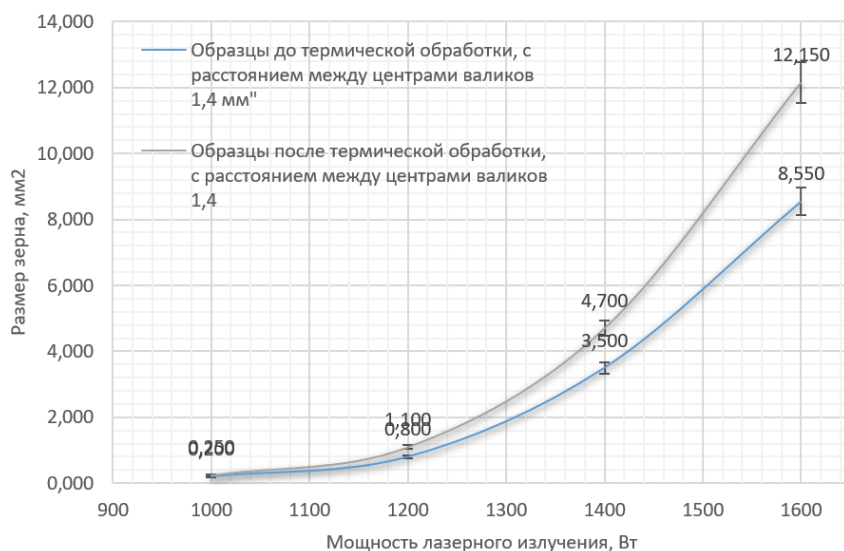


Рисунок 11 - График зависимости размера зерен от мощности лазерного излучения на образцах до и после термической обработки

При микроанализе установлено, что на всех образцах трековой структуры не наблюдается. Исследуемая микроструктура представляет собой зерна γ' -твердого раствора + упрочняющие фазы.

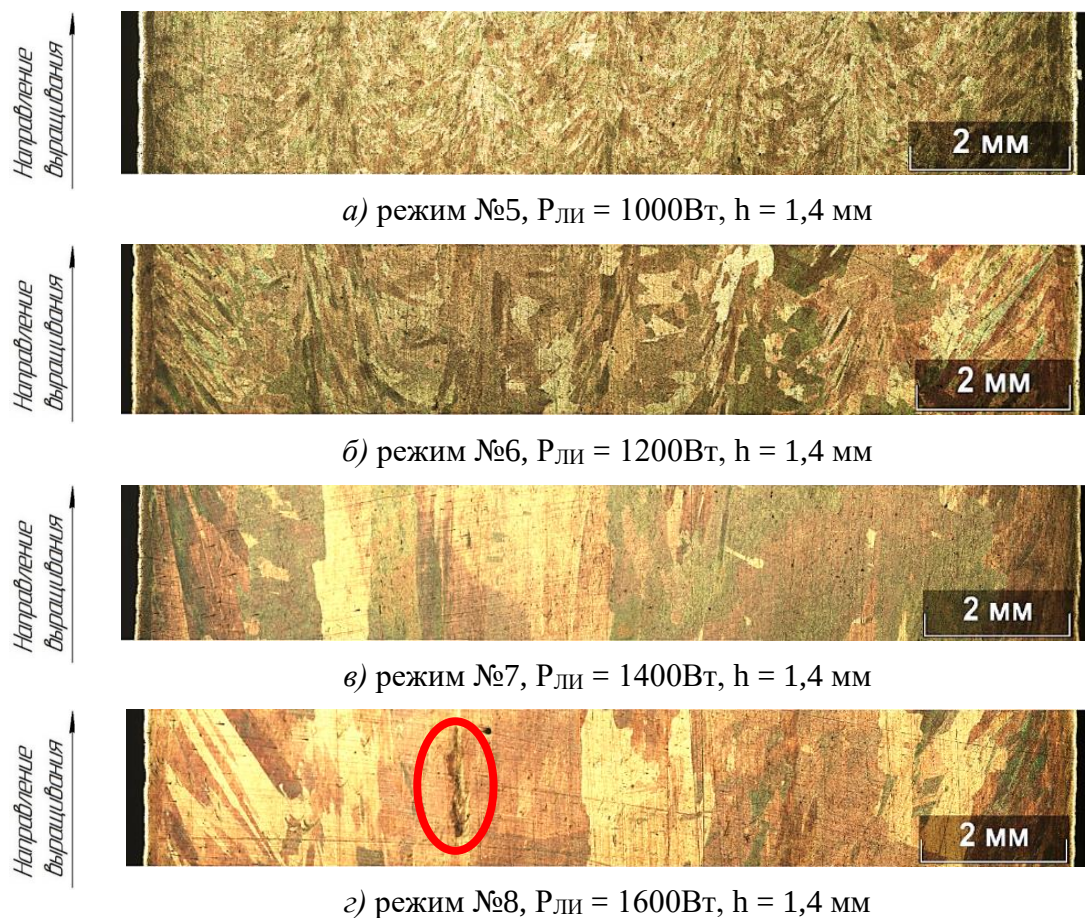


Рисунок 12 - Микроструктура материала жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ по ширине образцов после термической обработки

Из-за наличия трещин в образцах, полученных по режиму №8, механическим испытаниям были подвергнуты образцы, изготовленные только по режимам 5, 6 и 7 (с мощностью лазерного излучения 1000 Вт, 1200 Вт и 1400 Вт соответственно) и с выполненной термической обработкой, опробованной в разделе 4.

Полученные механические свойства образцов, изготовленных по режиму №5, однородны в долевом и поперечном направлениях относительно направления роста (рисунок 13). На образцах, полученных по режиму №6, наблюдается снижение пластических характеристик δ и ψ в поперечном направлении на ~26% и ~42% соответственно по сравнению с долевым направлением.

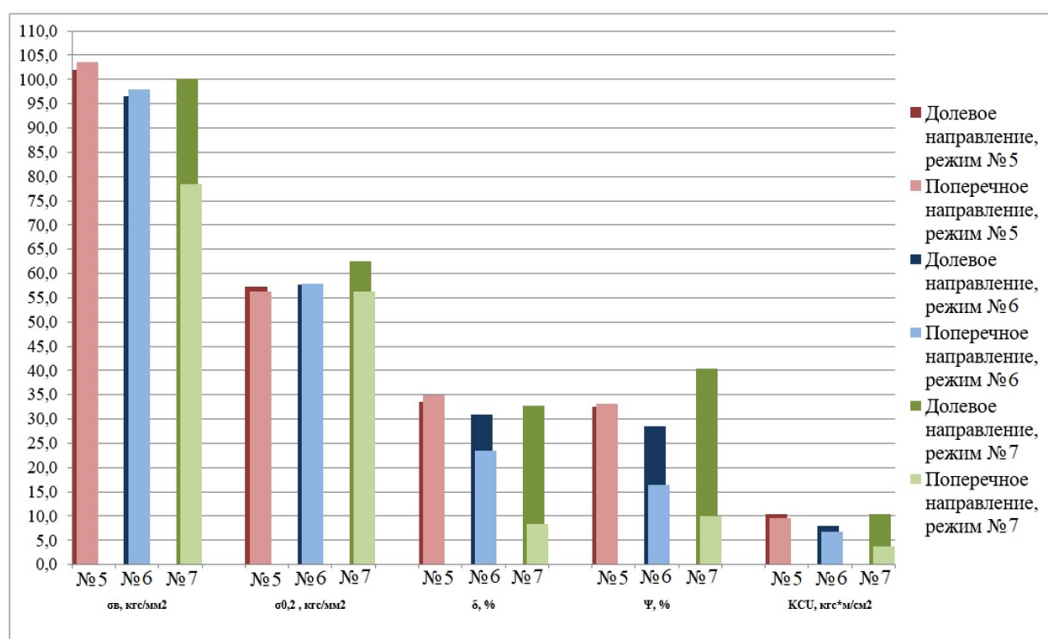


Рисунок 13 - Диаграмма сравнения кратковременных механических свойств образцов: режим №5, $P_{\text{ли}} = 1000\text{Вт}$, $h = 1,4\text{ мм}$; режим №6, $P_{\text{ли}} = 1200\text{Вт}$, $h = 1,4\text{ мм}$; режим №7, $P_{\text{ли}} = 1400\text{Вт}$, $h = 1,4\text{ мм}$

Прочностные характеристики находятся примерно на одном уровне. На образцах, полученных по режиму №7, наблюдается значительное снижение свойств в поперечном направлении относительно долевого: $\sigma_{\text{в}}$ на ~22%, $\sigma_{0.2}$ на ~9,8%, δ на ~74%, ψ на ~75%, KCU на ~64%. Уровень полученных механических свойств при комнатной температуре на образцах, полученных прямым лазерным нанесением, по всем исследуемым режимам превышает справочные данные ВИАМ. Снижение уровня предела прочности и относительного удлинения наблюдается только на образцах режима №7 в поперечном направлении. Изломы всех изготовленных образцов из жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ имеют хрупкое разрушение. На всех испытанных образцах наследована структура, выявленная ранее при металлографических исследованиях.

Результаты испытаний на длительную прочность представлены на рисунке 14.

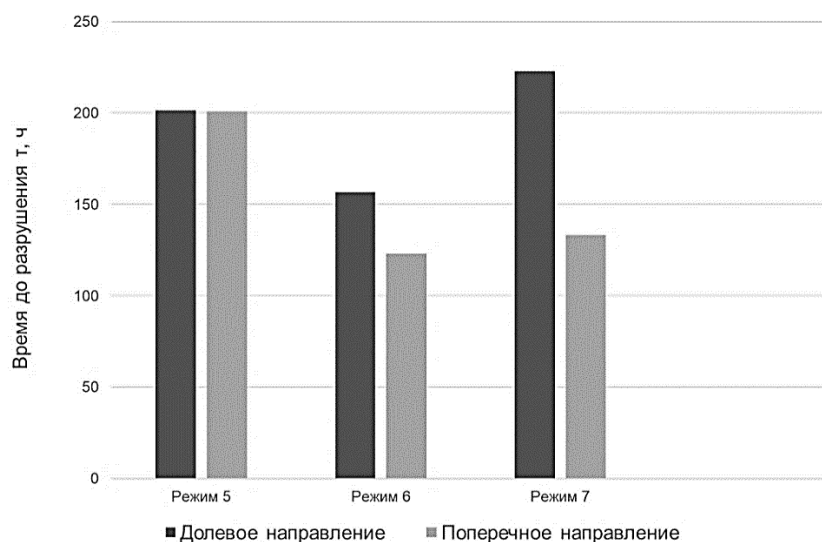


Рисунок 14 - Диаграмма сравнения длительных механических свойств образцов: режим №5, $P_{\text{ли}} = 1000\text{Вт}$, $h = 1,4\text{ мм}$; режим №6, $P_{\text{ли}} = 1200\text{Вт}$, $h = 1,4\text{ мм}$; режим №7, $P_{\text{ли}} = 1400\text{Вт}$, $h = 1,4\text{ мм}$

Анализируя полученные результаты длительных свойств выявлено, что длительная прочность всех образцов превышает 100ч и соответствует установленным требованиям. На образцах, изготовленных по режиму №5 время до разрушения практически одинаково в обоих направлениях. На образцах, полученных по режимам №6 и №7 долговечность в поперечном направлении меньше по сравнению с долевым направлением на ~21,5% и ~40% соответственно.

Из представленных диаграмм видно, что образцы из жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ, изготовленные по режиму №5 с мощностью лазерного излучения 1000 Вт и расстоянием между центрами валиков 1,4 мм, имеют однородные свойства в продольном и поперечном сечениях относительно направления изготовления.

В пятой главе разработана технология получения опытной заготовки детали «Корпус» с помощью аддитивной технологии прямого лазерного нанесения металлов.

Для возможности изготовления по аддитивной технологии прямого лазерного нанесения на гибридном комплексе ГК-01, требуется оптимизация конструкции исходной детали «Корпус». При оптимизации учтены особенности самой технологии прямого лазерного нанесения и ограничения используемого для изготовления оборудования.

Полученная окончательная 3D модель заготовки «Корпус» является наиболее оптимизированной к изготовлению по аддитивной технологии прямого лазерного нанесения и с высокой долей вероятности обеспечит соответствие геометрии основных элементов после изготовления за счет установленных ребер жесткости (рисунок 15).

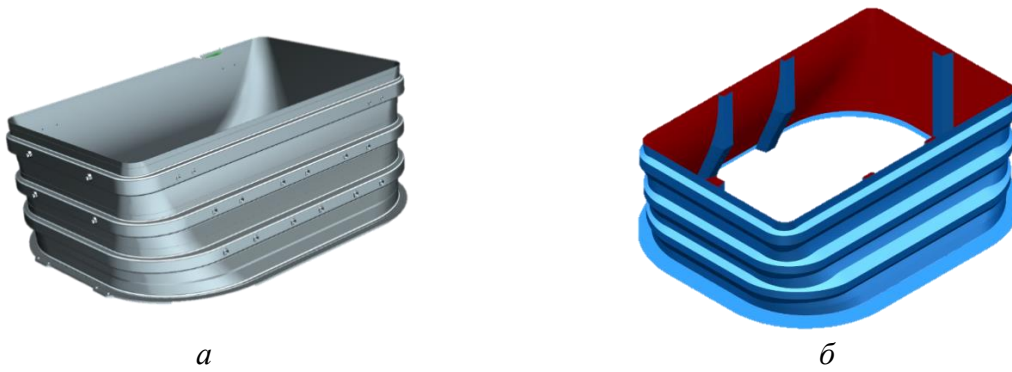


Рисунок 15 – 3D-модель заготовки детали «Корпус»: а) до оптимизации; б) после оптимизации

По разработанной 3D модели заготовки, разрабатывалась управляющая программа, которая была проверена как вручную, так и с использованием станка с ЧПУ (гибридного комплекса ГК-01). Результатом выполненной в данной главе работы является разработанный маршрутно-технологический процесс.

В шестой главе проведена апробация разработанной технологии получения опытной заготовки детали «Корпус» с помощью аддитивной технологии прямого лазерного нанесения металлов.

Полученная в результате изготовления заготовка представлена на рисунке 16.



Рисунок 16 – Изготовленная заготовка детали «Корпус» по аддитивной технологии прямого лазерного нанесения: а) вид спереди; б) вид сбоку; в) вид сверху

Заготовка при промежуточном контроле не имела дефектов, все слои наносились равномерно. Геометрия заготовки при визуальном осмотре соответствует исходной 3D модели. После прямого лазерного нанесения заготовка была подвергнута термической обработке для снятия напряжений по

отработанному ранее в работе режиму. Исправление дефектов после прямого лазерного нанесения не потребовалось.

Заключительным этапом, является контроль геометрии опытной заготовки детали «Корпус» при помощи 3D сканирования на ATOS. Результат замеров представлен на рисунке 17.

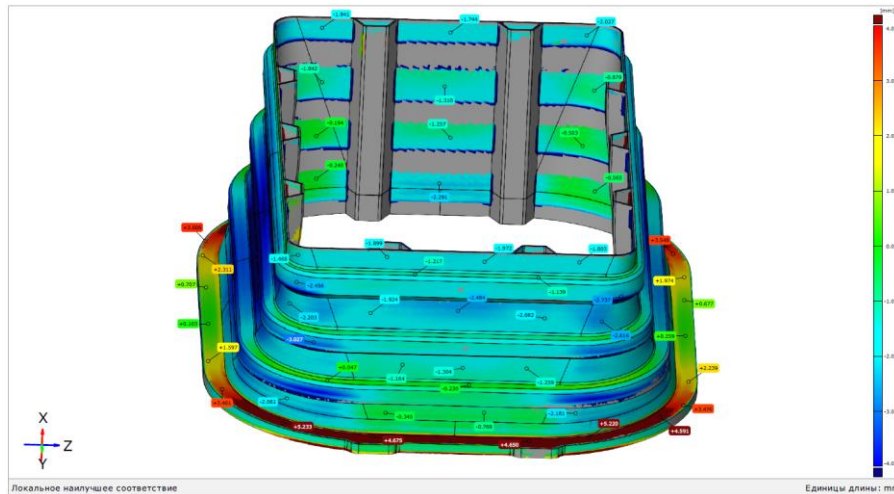


Рисунок 17 – Результаты замеров заготовки детали «Корпус» на ATOS

По результатам замеров выявлено, что установленные ребра жесткости удержали геометрию заготовки при прямом лазерном нанесении и термической обработке. Отклонения по длинной стороне составляют до 5 мм, по короткой стороне до 2 мм.

Стоит учесть, что при прямом лазерном нанесении заготовки лазерный луч шел строго по траектории программы и попадал ровно в назначенное место. Это значит, что заготовка при изготовлении полностью соответствовала 3D модели, а полученные деформации произошли в результате термической обработки.

Полученная геометрия заготовки удовлетворяет предъявляемым требованиям для опытной детали.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В данной работе было проведено исследование структуры и свойств жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ, полученного по аддитивной технологии прямого лазерного нанесения, с целью обеспечения требуемых эксплуатационных характеристик крупногабаритных деталей.

Работа является на сегодняшний день новой, и была выполнена в полном объеме. По результатам работы получены следующие результаты:

1. Выполнены исследования исходных МПК производства ФГУП «ВИАМ» и АО «Композит», по результатам которых была выбрана МПК из жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ производства АО «Композит» соответствующая всем предъявляемым требованиям и превосходящая по качеству МПК из жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ производства ФГУП «ВИАМ». При

изготовлении деталей прямым лазерным нанесением, учитывая наследственность материала, в структуре деталей будет отсутствовать пористость, переносимая из исходной МПК. Также изготавливаемый материал деталей будет иметь равномерное распределение химических элементов в объеме;

2. Выполнено исследование влияния режимов прямого лазерного нанесения на структуру и свойства жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ. Установлены закономерности формирования структуры и свойств наплавленных слоев жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ при воздействии лазерного излучения. Во всех исследуемых образцах наблюдается увеличение размера зерна с ростом мощности лазерного излучения, что непосредственно связано с уменьшением скорости охлаждения материала образцов при прямом лазерном нанесении за счет увеличения тепловложения. При большем нагреве материала зерна прорастают до больших размеров (практически на всю высоту образца при мощности лазерного излучения 1600 Вт, режим №8). Также выявлено что с увеличением мощности лазерного излучения уменьшается количество дефектов в виде пор и несплавов. Аналогично происходит и с уменьшением расстояния между центрами наплаваемых валиков, за счет увеличения перекрытия. На подобранных режимах прямого лазерного нанесения обнаружены только единичные дефекты. Диаметр пор в образцах, изготовленных по режимам №5 (мощность лазерного излучения 1000 Вт) и 6 (мощность лазерного излучения 1200 Вт) составляет до 0,015 мм, в образцах №7 (мощность лазерного излучения 1400 Вт) до 0,012 мм.;

3. Установлено положительное влияние термической обработки на структуру и свойства образцов из жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ, полученных по аддитивной технологии прямого лазерного нанесения. Подобранный термическая обработка позволила снять внутренние напряжения и избавиться от трещинообразования;

4. На основании установленных зависимостей определен оптимальный режим прямого лазерного нанесения ($P_{\text{ли}} = 1000$ Вт; $v_{\text{напл}} = 20$ мм/с), обеспечивающий минимальное количество дефектов структуры и требуемый уровень механических свойств. Образцы, изготовленные по данному режиму, имеют следующие кратковременные механические свойства: $\sigma_{\text{в}} = 1013-1046$ МПа, $\sigma_{0,2} = 557-583$ МПа, $\delta = 31,8-36,1$ %, $\psi = 31,6-34,8$ %, $KCU = 9,1-9,6$ кгс*м/см². На длительных испытаниях образцы простояли по 200 часов, при норме в 100 часов. Все полученные свойства превышают норму на данный сплав. Свойства в различных направлениях однородны;

5. Выполнена оптимизация конструкции изготавливаемого изделия с учетом особенностей прямого лазерного нанесения;

6. Разработан маршрутно-технологический процесс изготовления заготовки детали «Корпус» из жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ по аддитивной технологии прямого лазерного нанесения.

7. Получена опытная крупногабаритная заготовка детали «Корпус» для перспективного ГТД, прошедшая опытно-промышленную апробацию.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

Публикации в изданиях, входящих в базу цитирования Scopus:

1. Khakimov, A.M. Investigation of the parameters of direct laser growing and subsequent processing to obtain a defect-free structure of a material made of a heat-resistant EP648 alloy [Текст] / A.M. Khakimov, S.S. Zhatkin, K.V. Nikitin // Journal of Physics: Conference Series. 2021. –Vol. 2094.
2. Khakimov, A.M. The influence of Direct Laser Deposition on the Structure and Properties of Ni–Cr–W–Mo Heat-Resistant Nickel Alloy [Текст] / A.M. Khakimov, K.V. Nikitin, S.S. Zhatkin and other // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2022. Vol. 63. No. 3. P. 305–314.

Публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК:

1. Климов, В.Г. Использование высокотемпературных порошковых никелевых припоев в качестве износостойких наплавов на торец пера лопатки турбины [Текст] / В.Г. Климов, С.С. Жаткин, Д.А. Баранов и др. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Т. 18, №1 (2). – Самара. – 2016. – С. 229-233.
2. Хакимов, А.М. Исследование влияния присадочных материалов на структуру и свойства зон лазерной наплавки лопаток ГТД [Текст] / А.М. Хакимов, В.Г. Климов, С.С. Жаткин и др. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Т. 19, №1 (2). – Самара. – 2017. – С. 302-306.
3. Хакимов, А.М. Износостойкость высокотемпературных порошковых припоев на Ni-основе после импульсной лазерной наплавки [Текст] / А.М. Хакимов, С.С. Жаткин // Металлургия машиностроения. №2. – Москва. – 2019. – С.38-41.
4. Хакимов, А.М. Исследование структуры и свойств деталей из жаропрочных и нержавеющей сплавов, полученных технологией прямого лазерного выращивания [Текст] / А.М. Хакимов, С.С. Жаткин, Е.Ю. Щедрин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Т. 22, №2. – Самара. – 2020. – С. 59-66.
5. Хакимов, А.М. Влияние технологии прямого лазерного выращивания на структуру и свойства жаропрочного никелевого сплава системы Ni–Cr–W–Mo [Текст] / А.М. Хакимов, С.С. Жаткин, К.В. Никитин и др. // Известия вузов. Цветная металлургия. 2022. Т. 28. №. 2. - С. 60–70.

Публикации в прочих изданиях:

1. Хакимов, А.М. Исследование свойств образцов полученных технологией прямого лазерного выращивания из металлопорошковой композиции жаропрочного сплава ХН55В5МБТЮ [Текст] / А.М. Хакимов, А.А. Жадяев // Наука молодых - будущее России: сборник научных статей 5-й Международной научной конференции перспективных разработок молодых ученых. Т.1. – Курск. – 2020. - С. 191-195.

2. Хакимов, А.М. Износостойкость порошковых припоев на основе никеля после лазерной наплавки [Текст] / А.М. Хакимов, С.С. Жаткин // Наследственность в литейно-металлургических процессах. Материалы 8-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Самара. – 2018. – С.451-459.

3. Хакимов, А.М. Влияние термической обработки на износостойкость высокотемпературных порошковых припоев на основе никеля после импульсной лазерной наплавки [Текст] / А.М. Хакимов, С.С. Жаткин // Высокие технологии в машиностроении: материалы XVII Всероссийской научно-технической конференции. – Самара. – 2018. – С.150-152.

Научное издание

Хакимов Алексей Мунирович

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук на тему:

«Структура и свойства жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ при изготовлении крупногабаритных деталей ГТД по аддитивной технологии прямого лазерного нанесения металлов»

Автореферат отпечатан с разрешения объединённого диссертационного совета 99.2.039.02 (Д999.122.02) на базе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», ФГАОУ «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»

(протокол №12 от «26» сентября 2022г.)

Формат 60х84 1/16. Набор компьютерный.

Усл. печ. л. 1,00. Тираж 100 экз. Заказ №____.

Отпечатано на ризографе.

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»,

Отдел типографии и оперативной печати

443100 г. Самара ул. Молодогвардейская, 244