МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет»

На правах рукописи

Хакимов Алексей Мунирович

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

2.6.17. Материаловедение

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор Никитин Константин Владимирович

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ5
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ10
1.1 Жаропрочные гомогенные, дисперсионно-твердеющие железохромо-
никелевые и никелевые сплавы и их свариваемость10
1.2 Традиционные технологии получения корпусных деталей ГТД14
1.3 Анализ применяемых аддитивных технологий изготовления деталей из
металлов16
1.4 Наплавочные материалы
1.5 Цели и задачи
2 МЕТОДИКИ И МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В
ИССЛЕДОВАНИЯХ
2.1 Материалы и образцы
2.2 Методика прямого лазерного нанесения
2.3 Металлографические исследования и механические испытания
наплавленного материала44
3 ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ИСХОДНЫХ
МЕТАЛЛОПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ ИЗ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА
ХН50ВМТЮБ47
3.1 Исследование качества металлопорошковой композиции
производства ФГУП «ВИАМ»47
3.2 Исследование качества металлопорошковой композиции
производства АО «Композит»50
Выводы по главе
4 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ПРЯМОГО
ЛАЗЕРНОГО НАНЕСЕНИЯ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ
И СВОЙСТВА ОБРАЗЦОВ ИЗ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА ХН50ВМТЮБ59

6 АПРОБАЦИЯ РАЗРАБОТАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ОПЫТНОЙ ЗАГОТОВКИ ДЕТАЛИ «КОРПУС» С ПОМОЩЬЮ АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО НАНЕСЕНИЯ МЕТАЛЛОВ.......119

ПРИЛОЖЕНИЕ	A:	Акт	0	внедрении	результатов	диссертационной	
работы			••••	• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •		146	
ПРИЛОЖЕНИЕ Б: Разработанный технологический процесс147							

ВВЕДЕНИЕ

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.

Деталями ГТД из жаропрочных сплавов на основе никеля являются диски, сопловые и рабочие лопатки турбины, элементы камеры сгорания и т.д. Наиболее распространены сплавы XH60BT (ВЖ98, ЭИ868), XH50BMTЮБ (ЭП648), XH68BMTЮК (ЭП693), XH56BMTЮ (ЭП199) и др.

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

В связи с вышеуказанным, все большую актуальность приобретают задачи, связанные с внедрением аддитивных процессов в производство крупногабаритных деталей, 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 XH50BMTЮБ;

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 XH50BMTЮБ, 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 ($P_{\Pi N}$ = 1000 Вт; $\nu_{\text{напл}}$ = 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. Подобранная 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 °C.

Предмет исследования: возможность применения в аддитивной технологии прямого лазерного нанесения жаропрочного стареющего свариваемого никель-хромового сплава XH50BMTЮБ, 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 XH50BMTЮБ;

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 XH50BMTЮБ; изготовление опытной заготовки детали «Корпус».

Публикации: По теме диссертационной работы опубликовано 10 научных работ, в том числе: 2 работы опубликовано в изданиях, входящих в базу международного цитирования Scopus и Web of Science; 5 работ, опубликовано 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 научнотехнических 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 АРІТЕСН-ІІІ-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 «3Dтехнологии для бизнеса» (Тольятти, 2018);

3. Грамота за создание новой технологии «Авиастроитель года», (Жуковский, 2019).

Структура и объем работы. Настоящая диссертационная работа состоит из введения, семи глав, заключения, списка использованных источников, включающего 61 наименование, и приложения. Работа содержит 112 рисунков, 24 таблицы. Объем работы составляет 147 страниц.

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

1.1 Жаропрочные гомогенные, дисперсионно-твердеющие железохромоникелевые и никелевые сплавы и их свариваемость

Газотурбинный двигатель (ГТД) на сегодняшний день является одним из самых технически сложных изделий современного машиностроения, детали которого работают длительное время в условиях предельно высоких температур и нагрузок. За шестьдесят лет своего развития ГТД стали основным типом двигателей в современной авиации. Это стало возможным в первую очередь ввиду их высочайшей надежности, которая обеспечивается новаторскими конструкторскими и технологическими решениями, проведенными газодинамическими, тепловыми и прочностными расчетами. На базе авиационных ГТД созданы двигательные установки в наземной и морской тематике: на мобильных электростанциях, газокомпрессорных станциях, наземных и морских транспортных средствах [1].

Тенденцией его развития является повышение температуры газа и эксплуатационных нагрузок [2]. Ключевые показатели эффективности работы ГТД – это его КПД и экономичность. КПД возможно повысить за счет увеличения рабочей температуры турбины двигателя, так как с повышением температуры рабочих газов уменьшается удельный расход топлива и воздуха на единицу мощности.

В связи с этим в двигателестроении широко применяются сложнолегированные сплавы, обладающие высокими эксплуатационными свойствами, такими как жаропрочность и жаростойкость. Данные сплавы находят все большее применение в проектировании и изготовлении узлов компрессоров, турбин и камер сгорания ГТД [3].

К этим материалам относятся жаропрочные гомогенные, дисперсионнотвердеющие железохромоникелевые и никелевые сплавы, основой которых является никель (таблица 1.1) [4].

Сплав	Содержание элементов, %												
	С	Si	Mn	Cr	Ni	W	Мо	Nb	Al	Ti	Fe	В	Прочие
ХН50МВКТЮР	≤0,1	≤0,3	≤0,3	17,5-		5,5-7,0	3,5-5	≤1,5	2,5-3	1-1,5	≤3,0	≤0,005	5-8 Co,
(ЭП99)				19,5									≤0,02Ce
ХН56ВМТЮ	≤0,1	≤0,6	≤0,5	19-22		9-11	4-5	-	2,1-2,6	1,1-1,6	≤4,0	≤0,008	≤0,05 Mg
(ЭП199)													
XH78T	≤0,12	≤0,8	≤0,7	19-22	Основа	-	-	-	≤0,15	0,15-	≤1,0	-	≤0,2 Cu
(ЭИ435)										0,35			
XH30BMT	≤0,1	≤0,6	≤0,6	14-16	27-30	4,5-6	3-4	-	≤0,5	1,8-2,3	Основа	-	≤0.02 Zr
(ЭП437)													
ХН75МБЮ	≤0,1	$\leq 0,8$	≤0,4	19-22		-	1,8-2,3	0,9-1,3	0,35-	0,35-	-	-	-
(ЭИ602)									0,75	0,75			
ХН50ВМТЮБ	≤0,1	≤0,4	≤0,5	32-35	Основа	4,3-5,3	2,3-3,5	0,5-1,1	0,5-1,1	0,5-1,1	≤4,0	≤0,008	-
(ЭП648, ВХ4Л)													
XH60B	≤0,1	$\leq 0,8$	≤0,5	23,5-		13-16	-	-	≤0,5	0,3-0,7	≤4	-	-
(ЭИ686)				26,5									
ХН68ВМТЮК	≤0,1	≤0,5	≤0,4	17-20		5-7	3-5	-	1,6-2,3	1,1-1,6	≤5,0	≤0,005	5-8 Co,
(ЭП693)													_≤0,05Ce
ХН62ВМЮТ	≤0,1	≤0,6	≤0,3	17,5-20		5,5-7,5	4-6	-	1,9-2,3	1,0-1,4	≤4,0	≤0,008	≤0,03 Ce
(ЭП708)													
ХН45МВТЮБР	≤0,1	≤0,3	≤0,6	14-16	43-47	2,5-3,5	4-5,2	0,8-1,5	0,9-1,4	1,9-2,4		≤0,008	≤0,02 Zr,
(ЭП718)													≤0,1Ce
ХН65ВММБЮ	≤0,06	≤0,5	≤0,5	17-18,5		5,5-7,5	3-5	4-4,7	1,5-1,9	-	≤1,5	≤0,006	0,1-
(ЭП914)													0,2Nb
ВЖЛ14	≤0,08	≤0,4	≤0,4	18-20		-	4-5		1,2-1,5	2,5-3,1	8-10	≤0,005	-

Таблица 1.1 – Химический состав жаропрочных дисперсионно-твердеющих железохромоникелевых и никелевых

сплавов

Из-за разнообразного химического состава, данные сплавы чувствительны к термическим воздействиям, таким как наплавка [5].

Стремление повысить жаропрочность жаропрочных гомогенных, дисперсионно-твердеющих железохромоникелевых и никелевых сплавов приводит к снижению параметров свариваемости, то есть уменьшается сопротивляемость материала к трещинообразованию при наплавке и последующей термической обработке. В связи с вышеуказанными факторами, к никелевым сплавам предъявляют особые требования для создания качественных изделий.

Сплавы, упрочнённые молибденом, ниобием и вольфрамом, имеющие аустенитную структуру γ-твердого раствора, являются жаропрочными гомогенными сплавами, например, сплавы ЭИ435, ЭИ602, ЭИ868. Увеличение содержания данных химических элементов путем легирования сплавов способствуют повышению кратковременной, длительной прочности и стойкости против образования горячих трещин. За счет легирования хромом достигается высокая окалиностойкость [4].

Ключевой особенностью жаропрочных никелевых (ЭП99, ЭП199, ЭП648, ЭП693, ЭП708, ЭП914, ВХ4Л, ВЖЛ14) и дисперсионно-твердеющих железохромоникелевых (ЭП437, ЭП718) сплавов является содержание алюминия и титана, достаточное для формирования γ' -фазы типа Ni₃(Al, Ti) при взаимодействии с никелем. Структура данных сплавов, представляющая собой твердый раствор с ГЦК-решеткой, включает в себя карбиды, нитриды и интерметаллидную γ' -фазу. Наследственная пластичность γ' -фазы препятствует охрупчиванию металла, при этом ее прочность увеличивается с повышением температуры. Состав и размер γ' фазы определяются количеством алюминия и титана в сплаве. При этом тугоплавкие элементы, такие как ниобий, тантал, вольфрам и молибден, также могут образовывать γ' -фазу, либо повышать ее содержание, чем в свою очередь укрепляют твердый раствор.

Последующая термическая обработка в виде закалки и старения приводит к образованию мелкодисперсных выделений γ' -фазы, которые препятствуют пла-

12

стическим деформациям в металле (таблица 1.2), в результате чего достигается наибольшая жаропрочность сплавов [4].

Сплав	Закалка при тем-	Старение при темпе-	γ´-фаза, %
	пературе,° С, на	ратуре, °С, в течение,	
	воздухе	ч, на воздухе	
ХН78Т (ЭИ435)	1020	-	-
ХН75МБЮ (ЭИ602)	1050	-	-
ХН60В (ЭИ686)	1170	-	-
ХН30ВМТ (ЭП437)	1120	750, 16	3-4
ХН50ВМТЮБ (ЭП648, ВХ4Л)	1150	900, 16	<5
ХН45МВТЮБР (ЭП718)	1050	780, 5	
		650, 16	10-11
ХН65ВММБЮ (ЭП914)	1100	800, 16	10-12
ХН68ВМТЮК (ЭП693)	1100	900, 5	13-15
ХН62ВМЮТ (ЭП708)	1100	800, 15	13-16
ХН56ВМТЮ (ЭП199)	1150	950, 5	16
ХН50МВКТЮР (ЭП99)	1100	900, 8	18-20
ВЖЛ14	1120	700, 16	16

Таблица 1.2 – Процентное содержание γ' -фазы в жаропрочных дисперсионно-твердеющих железохромоникелевых и никелевых сплавах

Формирование физических свойств сплавов, таких как коэффициент линейного расширения (КЛР), горячая пластичность, предел прочности и текучести определяются составом легирующих компонентов и их процентным содержанием. Данные свойства материала формируют показатели свариваемости [6].

На повышение стойкости к трещинообразованию оказывают влияние снижение КЛР, уменьшение жаропрочности сплава и предела текучести, увеличение темпа восстановления. Это хорошо объясняется применением модели движущегося точечного источника, который приводит к возникновению деформаций и напряжений на примере сварного соединения. Образование трещин при наплавке происходит в виду уменьшения запаса пластичности металла, то есть темп роста напряжений больше темпа восстановления деформационной способности.

Если обратиться к ГОСТ 29273-92 [7], то свариваемость – это способность обеспечивать сваркой металлическую целостность при соответствующей технологии, чтобы свариваемые заготовки отвечали нормативно-технической доку-

ментации, как в отношении их собственных качеств, так и в отношении их влияния на изделие, которое они образуют. Данный термин применим и к аддитивному процессу прямого лазерного нанесения металла, так как он схож с процессом сварки.

1.2 Традиционные технологии получения корпусных деталей ГТД

Корпусные детали ГТД отличаются многообразием форм и способом изготовления. К корпусным деталям ГТД предъявляются высокие требования по прочности и жесткости, они должны обеспечить: свободу от температурных деформаций отдельных элементов, входящих в корпусы; постоянство точности относительного положения деталей и узлов в статическом и динамическом состояниях; герметичность и прочность соединений; простоту и удобство изготовления и сборки. В то же время корпусные детали должны иметь малую массу [8].

Корпусные детали ГТД можно условно разделить по конструктивнотехнологическому признаку на следующие группы:

1) крупногабаритные полые тонкостенные корпусные детали цилиндрической и конической формы (корпусы осевых компрессоров и сопловых аппаратов, турбины, форсажной камеры, реактивного сопла и др.).

2) крупногабаритные силовые детали сложной формы (корпусы средней опоры, корпусы переднего и заднего подшипника и др.).

3) корпусные детали с фасонными поверхностями газовых и жидкостных трактов (корпусы входной части двигателя, вентилятора, камер сгорания, диффузора и др.);

4) корпусные детали коробчатого типа (корпусы приводов агрегатов, центробежных насосов, редукторов, маслонасосов и др.).

5) мелкие корпусные детали агрегатов регулирования и управления [8].

Традиционное изготовление крупногабаритных корпусных заготовок ГТД из металлов включает в себя изготовление большого количества сборочных еди-

ниц с применением листовой штамповки, литья, механической обработки и их последующей сварки.

Изготовление тонкостенных заготовок имеет принципиальную последовательность технологических операций:

 – раскрой заготовок из листового материала на лазерном и гидроабразивном оборудовании;

– штамповка;

- термофиксация;

 подгонка под сварку, сборка-прихватка ручной аргонодуговой сваркой, аргонодуговая сварка (ручная или автоматическая);

– обрезка технологического припуска, зачистка (возможна, прокатка) швов.

Необходимо отметить, что крупногабаритные тонкостенные детали требуют изготовления дорогостоящей штамповой оснастки.

Наиболее массивные части корпусных заготовок, например, такие как «фланцы», изготавливаются из сортового проката (цельнокатанных) или литых заготовок.

Принципиальная последовательность технологических операций для изготовления заготовок из сортового проката:

- сварка кольцевой заготовки;

- свободная ковка (возможно, штамповка);
- термическая обработка заготовки (отжиг);
- предварительная механическая обработка;
- термическая обработка заготовки (отжиг);

– окончательная механическая обработка.

Крупногабаритные корпусные детали ГТД проходят следующие основные виды контроля:

- визуальный контроль на наличие трещин и прочих мелких дефектов;

- рентген контроль (если позволяет геометрия) или другие методы неразрушающего контроля; - ЛЮМ контроль (люминесцентная дефектоскопия);

Методы испытаний:

С деталями изготавливают образцы свидетели, которые в дальнейшем проходят весь цикл изготовления совместно с деталью.

По окончанию изготовления изготавливаются разрывные и ударные образцы и испытываются с целью подтверждения полученных свойств требуемым в окончательно готовых деталях.

После подтверждения свойств и отсутствия недопустимых дефектов деталь признается годной и отправляется на сборку. В противном случае деталь бракуется или отправляется на доработку, если дефекты исправимые.

Также могут применяться дополнительные методы контроля.

Таким образом, изготовление крупногабаритных корпусных заготовок традиционными технологиями является дорогостоящим и трудоемким процессом.

1.3 Анализ применяемых аддитивных технологий изготовления деталей из металлов

Аддитивные технологии за последние десятилетия образовали интенсивно развивающуюся группу технологий в машиностроении, которая достигла большого количества практических результатов, в результате чего был сформирован рынок технологий, оборудования и услуг на мировом уровне, проводятся научноисследовательские и опытно-конструкторские работы, подготавливаются специалисты, появилась учебно-методическая литература [9-11]. Также в настоящее время проводятся интенсивные работы по стандартизации и сертификации продукции.

В соответствии с ГОСТ Р 57558-2017/ISO/ASTM 52900:2015 [12] определено 7 типов процессов аддитивного производства, из которых только 2 типа процессов изготовления деталей из металлов развивается наиболее интенсивно и имеет наибольший интерес для машиностроения [13]: 1. Прямой подвод энергии и материала (directed energy deposition). Процесс, в котором энергия от внешнего источника используется для соединения материалов путем их сплавления в процессе нанесения [12];

2. Синтез на подложке (powder bed fusion). Процесс, в котором энергия от внешнего источника используется для избирательного спекания/сплавления предварительно нанесенного слоя порошкового материала [12].

К типу аддитивного процесса синтеза на подложке можно отнести следующие основные аддитивные технологии:

1. Селективное лазерное сплавление (SLM – «Selective Laser Melting»). Технология аддитивного производства, использующая лазеры высокой мощности для изготовления трехмерных объектов из металлических порошков [14-15]. Суть технологии селективного лазерного сплавления заключается в послойном изготовлении детали посредством сплавления слоев в порошковой ванне, где тепловым источником служит лазерное излучение [16];

2. Селективное лазерное спекание (SLS – «Selective Laser Sintering»). Технология аддитивного производства, которая использует энергию лазерного излучения для избирательного нагрева частиц порошка, что приводит к оплавлению частиц и последующим затвердеванием для получения требуемой формы детали в соответствии с 3D моделью [17].

К типу аддитивного процесса прямого подвода энергии и материала можно отнести следующие основные аддитивные технологии:

1. Прямое лазерное нанесение (Laser Metal Deposition) Технология аддитивного производства, которая использует лазерное излучение для расплавления порошков, которые переносятся на целевую подложку потоком газа [18];

2. Электронно-лучевое плавление (EBM – «Electron Beam Melting»). Технология аддитивного производства, в которой создание объекта происходит путем плавления проволоки с помощью электронного луча [19].

Рассмотрим наиболее подробно основные технологии получения объектов из металлов.

Селективное лазерное сплавление (SLM – «Selective laser melting»). Принципиальная схема селективного лазерного сплавления представлена на рисунке 1.1.



Рисунок 1.1 – Принципиальная схема селективного лазерного сплавления [16]

Процесс печати начинается с разделения цифровой трехмерной модели на слои толщиной от 20 до 100 микрон. Готовый файл в стандартном формате STL используется в качестве чертежей для построения физической модели. Производственный цикл состоит из нанесения тонкого слоя порошка на рабочую поверхность – как правило, металлический стол, способный передвигаться в вертикальном направлении. Процесс печати протекает в рабочей камере, заполняемой инертными газами (например, аргоном). Отсутствие кислорода позволяет избежать оксидации расходного материала, что делает возможной печать такими материалами, как титан. Каждый слой модели сплавляется, повторяя контуры слоев цифровой модели. Плавка производится с помощью лазерного луча, направляемого по осям X и Y двумя зеркалами с высокой скоростью отклонения. Мощность лазерного излучателя достаточно высока для плавки частиц порошка в гомогенный материал.

Наиболее популярными материалами являются порошковые металлы и сплавы, включая нержавеющую сталь, инструментальную сталь, кобальтхромовые сплавы, титан, алюминий, и др. Технология селективного лазерного сплавления применяется для построения объектов сложной геометрической формы, зачастую с тонкими стенками и полостями. SLM успешно применяется в аэрокосмической отрасли, позволяя создавать высокопрочные элементы конструкций, недосягаемые по геометрической сложности для традиционных механических методов изготовления и обработки (фрезеровки, резки и т.д.).

Селективное лазерное спекание (SLS – «Selective Laser Sintering»). Технология основана на последовательном спекании слоев порошкового материала с помощью лазеров высокой мощности. SLS зачастую ошибочно принимают за схожий процесс, называемый селективным лазерным сплавлением (SLM). Разница заключается в том, что SLS обеспечивает лишь частичную плавку частиц порошка, необходимую для спекания материала, в то время как селективное лазерное сплавление подразумевает полную плавку частиц, необходимую для построения монолитных моделей.

В качестве расходных материалов используются пластики, металлы, керамика или стекло. Спекание производится за счет вычерчивания контуров, заложенных в цифровой модели с помощью одного или нескольких лазеров. По завершении сканирования рабочая платформа опускается, и наносится новый слой материала. Процесс повторяется до образования полной модели.

SLS не требует построения опорных структур. Навесные части модели поддерживаются неизрасходованным материалом. Такой подход позволяет добиться практически неограниченной геометрической сложности изготовляемых моделей.

В сравнении с другими методами аддитивного производства, SLS отличается высокой универсальностью в плане выбора расходных материалов. Сюда входят различные полимеры (например, нейлон или полистирол), металлы и сплавы

19

(сталь, титан, драгоценные металлы, кобальт-хромовые сплавы и др.), а также композиты и песчаные смеси.

Технология SLS получила широкое распространение по всему миру благодаря способности производить функциональные детали сложной геометрической формы. Хотя изначально технология создавалась для быстрого прототипирования, в последнее время SLS применяется для мелкосерийного производства готовых изделий. Достаточно неожиданным, но интересным применением SLS стало использование технологии в создании предметов искусства.

Электронно-лучевая плавление (EBM – «Electron Beam Melting»). Данная технология зачастую классифицируется как метод быстрого производства. Этот метод производства деталей произвольных форм позволяет создавать металлические объекты высокой плотности из металлической проволоки. Готовые изделия практически не отличаются от литых деталей по механическим свойствам. Устройство считывает данные с файла, содержащего трехмерную цифровую модель, и наносит последовательные слои. Контуры слоев модели вычерчиваются электронным пучком, плавящим проволоку в местах соприкосновения (рисунок 1.2).



Рисунок 1.2 – Принципиальная схема электронно-лучевой плавки

Плавка производится в вакуумных рабочих камерах, что позволяет работать с материалами, чувствительными к окислению – например, с чистым титаном. Технология получила применение в аэрокосмической отрасли: Boeing, Lockheed Martin и NASA используют EBM для производства деталей реактивных и ракетных двигателей, а также несущих элементов конструкции летательных аппаратов.

Прямое лазерное нанесение (Laser Metal Deposition). Процесс построения детали, в данной технологии, происходит за счет подачи сжатой газопорошковой струи непосредственно в фокус лазерного излучения, в результате чего происходит расплавление порошка и формируется ванна расплава. Перемещение наплавочной лазерной головки с заданной скоростью позволяет придавать детали требуемую геометрию (рисунок 1.3) [20; 21].



Рисунок 1.3 - Принципиальная схема построения детали по аддитивной технологии прямого лазерного нанесения

На рисунке 1.4 представлен пример компоновки технологического комплекса для реализации данного процесса, созданного в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого [22].



Рисунок 1.4 - Схематическое изображение частей комплекса для прямого лазерного нанесения [23]

В компоновку входят: 1 - рабочая камера; 2 - технологическая голова с присоединяемым соплом для подачи присадочного материала; 3 - система позиционирования технологической головы и платформы для крепления подложки; 4 порошковый питатель; 5 - блок газоподготовки; 6 - источник лазерного излучения; 7 - модуль охлаждения лазерного источника, технологической головы и сопла для подачи присадочного материала; 8 - стойка управления; 9 - модуль подготовки сжатого воздуха для защиты оптики.

Для реализации процесса прямого лазерного нанесения изделий из порошковых материалов применяются следующие виды комплексов: использующие линейные направляющие (рисунок 1.5 *a*)) или робот (рисунок 1.5 *б*)) для перемещения технологического инструмента и позиционер, установленный в рабочей камере для управления движением подложки, или оборудование, выполненное на базе ЧПУ комплексов для механообработки, с заменой рабочего инструмента на технологический и обеспечением заполнения рабочей камеры защитным газом (рисунок 1.5 *в*)) [24].





б



в

a

Рисунок 1.5 - Изображения ряда применяемых технологических машин для реализации процесса прямого лазерного нанесения изделий [23]

Основной рабочий орган аддитивных машин – это лазерная наплавочная головка, представляющая собой чрезвычайно сложный агрегат с системами фокусировки лазера, охлаждения и подачи материала, а также элементы системы управления (датчика, видеокамеры и т.д.). В процессе построения детали необходимо согласовать несколько параметров: мощность лазера, размер пятна расплава, интенсивность подачи материала, дисперсность порошкового материала, скорость движения головки, обеспечив при этом точную фокусировку подачи МПК в зону расплава. В зависимости от сочетания параметров построения коэффициент использования материала может варьироваться от 0,2 до 0,9, т.е. от 20 до 90% материала, поступившего через сопловые отверстия системы подачи, фактически формируя деталь. [9] Различные компании используют разные системы подачи материала: одноканальные, многоканальные (например, Optomec), коаксиальные (например, POM, Fraunhofer ILT), рисунки 1.6 и 1.7.



Рисунок 1.6 - Системы подачи материала: *a*) Optomec; *б*) Fraunhofer ILT [25;26]



Рисунок 1.7 - Системы подачи материала: *а*) коаксиальная; б) многоканальная [26]

Совершенствование систем подачи материалов ведется высокими темпами. В опытных образцах с мощными лазерами (4-10 кВт) достигнута производительность (темп осаждения материала) – 9-15 кг/ч [27].

Принцип нанесения покрытий при коаксиальной подаче порошка показан на рисунке 1.8 б).



Рисунок 1.8 - Системы подачи материала: а) боковая; б) коаксиальная

Газопорошковый поток подается в зону воздействия лазерного излучения симметрично со всех сторон - сжимающимся в фокус конусом. Такая наплавка наиболее универсальна, так как формируется симметричный наплавленный слой относительно направления наплавки, равномерно формируются валики, высокая производительность и высокий коэффициент использования присадочного материала. Недостатком является сложность подачи присадочного порошка коаксиальным способом.

Наплавка с помощью боковой подачи газопорошковой смеси является наиболее распространенным (рисунок 1.8 б)). Подача порошка в жидкую ванну качественно изменяет процесс наплавки, тем самым позволяя создавать как равномерные по толщине и химическому составу покрытия, так и композитные материалы с сохранением упрочняющей фазы. Недостатком является несимметричность подачи порошка относительно направления движения.

Многоканальное сопло в разрезе представлено на рисунке 1.9.

25



Рисунок 1.9 - Многоканальное сопло в разрезе

Многоканальная подача, в отличии от щелевого, позволяет повысить коэффициент захвата порошка, как при вертикальной наплавке, так и при наклоне наплавочной головы на 90°.

1.4 Наплавочные материалы

В настоящее время существует множество различных методов изготовления МПК, которые делятся на физико-химические и механические. Физикохимические методы связаны с физико-химическими превращениями исходного материала, при которых происходит существенное изменение химического состава и структуры конечного продукта – МПК. При механических методах изготовления существенного изменения химического состава и структуры не происходит. К таким методам относят размол в различных видах мельниц и метод атомизации, заключающийся в диспергировании расплава с помощью струи газа.

Получаемые частицы МПК методом размола имеют форму, далекую от сферической. Также, на полученных частицах может содержаться большое количество посторонних примесей, попадающих в результате износа размольных тел и футеровки мельницы. В связи с вышеуказанным, такие методы получения МПК не нашли применения для аддитивных технологических процессов. Наиболее распространенным методом является диспергирование расплава, так как он более производительный и экономичный. Данным методом эффективно получают частицы МПК мелких и средних фракций, которые составляют до 70% объема всех промышленных МПК [28]. Широкое распространение метода диспергирования расплавом получило при производстве МПК многокомпонентных сплавов, в частности имеющих аморфную структуру, позволяющего получать равномерное распределение химического состава в объеме частиц МПК. Частицы, полученные диспергированием расплава, в отличии от метода размола имеют форму близкую к сферической. Свыше 90% всех МПК, которые используются в аддитивных технологических процессах, получают данным методом.

В настоящее время, для аддитивных процессов получения деталей из металлов, выделяют 3 технологии получения МПК посредством атомизации: газовая, вакуумная и центробежная.

Газовая атомизация. В данной технологии расплавление металла происходит в плавильной камере, а для защиты от окисления в камере создают вакуум или инертную среду. Далее расплавленный металл сливается через распылитель, где и происходит распыление расплава посредством струи инертного газа находящегося под давлением. Для получения частиц МПК, имеющих фракционный состав 10-40мкм, которые наиболее часто используются в аддитивных процессах, применяют VIM-атомайзеры (Vacuum Induction Melting). В данных атомайзерах рабочие камеры, в которых происходит расплавление и распыление металла, с целью защиты расплава от окисления вакуумируют.

Технология получения МПК, с использованием оборудования для вакуумной плавки металла, называется VIGA – Vacuum Induction Melt Inert Gas Atomization «технология газового распыления металла, расплавленного в вакуумной камере, методом индукционного нагрева», рисунок 1.10.

27



Рисунок 1.10 - Схема атомайзера VIGA

В атомайзерах VIGA применяют два вида тиглей: поворотные и с донным сливом. Поворотные тигли используются для высокопроизводительного оборудования, с донным сливом в основном для лабораторного оборудования. Тигель может быть использован как керамический, так и графитовый, выбор которого позволяет достичь температуру плавления металла 1900°C. Далее расплавленный металл сливается в специальный приемник, к которому под давлением подается инертный газ.

Распыление металла включает в себя 3 фазы: начальную, рабочую и заключительную.

В начальной фазе происходит выход на рабочий режим, который длится несколько секунд. Происходит открытие клапана для слива металла, выжидается некоторого время для стабилизации потока расплава и включается подача распылительного газа.

В рабочей фазе процесс стабилизируется, достигается требуемое соотношение потока газа и металла.

Заключительная фаза длится также, как начальная и составляет несколько секунд. Происходит снижение потока газа и расплава. Полученная МПК на начальной и заключительной фазах является некондиционной, в связи с чем наиболее целесообразно увеличивать долю рабочей фазы.

Texнология EIGA (Electrode Induction Guide Inert Gas Atomization – индукционная плавка электрода с распылением газом) является одним из видов газовой атомизации. Данная технология была разработана для получения порошков реактивных металлов – Ti, Zr, Hf, V, Pt, Ir, Nb, Мо и т. д., поскольку плавка этих металлов в керамических тиглях затруднена даже в условиях вакуума.

В EIGA-атомайзерах распыление МПК происходит в струе потока инертного газа аргона. Атомайзер может быть использован в качестве плавильной установки, так как в конструкции может быть предусмотрена возможности слива расплавленного металла в изложницы.

Технология EIGA представлена на рисунке 1.11.

а



Рисунок 1.11 - Технология EIGA: *a*) исходный материал (feed stock) для получения МПК; б) схема процесса; в) процесс EIGA

Для данной технологии изготавливаются электроды в виде прутков (feed stock), которые оплавляются за счет индукционного нагрева, посредством опускания медленно вращающегося прутка в кольцевой индуктор (рисунок 1.11 б)).

Расплавленный металл попадает в форсунки, через которые за счет потока газа происходит распыление МПК. Данная технология позволяет распылять со скоростью порядка 0,5 кг/с и массой за одну плавку до десятков килограммов.

Plasma Atomization также является разновидностью технологии газовой атомизации. По данной технологии получают высококачественные и особо чистые МПК из металлов на основе Мо, Ті, Ni, Ta и Co-Cr, имеющие сферическую форму частиц. Расплавление металла производится за счет энергии плазмы [29]. Атомайзеры компании Raymor (Канада) включают в себя три плазматрона, энергия которых сфокусирована на конце подводимого металлического прутка (рисунок 1.12) [30].



Рисунок 1.12 - Технология Plasma Atomization: *a)* схема процесса; *б)* атомайзер Raymor [30]

Недостатком данной технологии является необходимость изготовления прутка для распыления, имеющего диаметр 1-5 мм. Несмотря на это, по данной технологии получают МПК высокого качества.

Энергия плазмы может применяться и для исправления морфологии частиц МПК, которые были получены не методами диспергирования расплава. Схема процесса плазменной обработки частиц МПК представлена на рисунке 1.13 [31].



Рисунок 1.13 - Схема процесса плазменной обработки МПК

Процесс исправления некондиционных частиц МПК заключается в оплавлении их плазмой, в результате чего они приобретают сферическую форму (рисунок 1.14).



Рисунок 1.14 - Сравнение морфологии исходной МПК и прошедшей плазменную обработку [31]: *а*) вольфрам до обработки; *б*) вольфрам после обработки d50 =50 мкм; *в*) SiO₂ до обработки; *г*) SiO₂ после обработки

Вакуумная атомизация. Технология вакуумной атомизации или Soluble gas atomization [32, 33] заключается в атомизации частиц МПК за счет растворенного в расплаве металла газа. Схема вакуумной атомизации представлена на рисунке 1.15.



Рисунок 1.15- Схема процесса вакуумной атомизации [33]

Атомайзер состоит из двух камер, плавильной, в которой происходит расплавление металла и распылительной. В плавильной камере создается избыточное давление газа (водород, гелий, азот) и происходит его растворение в расплавленном металле. За счет давления из плавильной камеры расплав поступает в форсунку, расположенную в распылительной камере где и происходит его распыление. В распылительной камере создается вакуум, что способствует выходу капель расплава и их последующему «взрыванию». В результате получают частицы сферичной формы, имеющие дисперсную структуру. Центробежная атомизация. Существует множество видов данной технологии [32, 33]. В технологии центробежной атомизации или Rotating Electrode Process (REP) распыление расплава происходит в результате нагрева электрической дугой вращающегося прутка. Пруток обычно имеет диаметр 15-75мм.

Схема процесса центробежного распыления представлена на рисунке 1.16.



Рисунок 1.16 - Схема процесса REP [33]

Преимуществом технологии центробежного распыления является отсутствие контакта с тиглем и различными разливочными устройствами, такими как в ранее представленных технологиях.

Другим вариантом технологии центробежного распыления является технология PREP (*Plasma Rotating Electrode Process*) [32, 33]. Плавление прутка в данной технологии происходит в результате его разогрева высокоскоростным потоком ионизированного инертного газа (плазмой). Данные технологии используются для получения особо чистых частиц МПК и имеют сферичную форму.

Сравнение структуры частиц МПК из сплава Ti-6Al-4V, полученных методами атомизации инертным газом и центробежной плазменной атомизацией (PREP), представлено на рисунке 1.17 [34, 35].



Рисунок 1.17 - Морфология частиц МПК Ті-6АІ-4V, полученных разными методами: *a*) – атомизация инертным газом; *б*) – центробежная плазменная атомизация (PREP) [34, 35]

Из рисунка видно, что частицы МПК, полученные методом PREP, отличаются правильной сферической формой и отсутствием «сателлитов» – пылевидных частиц, налипающих на более крупные в результате соударения в процессе газовой атомизации.

В исследуемой технологии прямого лазерного нанесения использовались МПК, полученные по технологии центробежного распыления (PREP).

Использование порошков, полученных по технологии центробежного распыления (PREP) обусловлено следующим:

1. Распыление происходит в вакууме или в инертной безобменной атмосфере, что позволяет получить более чистые МПК [36];

2. Внутри частиц образуется меньшее количество дефектов таких как поры, по сравнению с технологией газового распыления [37];

3. Получаемые частицы при подобранном режиме распыления обладают практически 100% сферической формой, согласно классификации по ГОСТ 25849-83 [38].

Примеры получаемых МПК также представлены во многих работах [39, 40].

1.5 Цели и задачи

На основании проведенного литературного анализа поставлена цель работы - исследовать структуру и свойства 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 поставлены следующие основные задачи:

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

6. Исследовать влияние режимов прямого лазерного нанесения и термической обработки на структуру и свойства жаропрочного сплава XH50BMTЮБ;

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

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

2 МЕТОДИКИ И МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ИССЛЕДОВАНИЯХ

Данная диссертационная работа включает в себя ряд взаимосвязанных технологических и исследовательских этапов прямого лазерного нанесения. Для более наглядного представления разработана схема, которая представлена на рисунке 2.1.



Рисунок 2.1 – Схема проведения исследований

По результатам исследовательских этапов предусмотрена разработка технологических рекомендаций и комплекса технологических решений с опытнопромышленными испытаниями.

В качестве опытной детали выбран корпус выходного устройства перспективного ГТД (рисунок 2.2). Планируемый к изготовлению материал – жаропрочный сплав на основе никеля ХН50ВМТЮБ. Деталь «Корпус» изготавливается впервые и производство не подготовлено для ее изготовления. В связи с поставленными сжатыми сроками, решено изготавливать с применением аддитивной технологии прямого лазерного нанесения.


Рисунок 2.2 – 3D-модель детали «Корпус»

Габаритные размеры детали «Корпус» представлены на рисунке 2.3.



Рисунок 2.3 – Габаритные размеры детали «Корпус»

Изготовление заготовки детали «Корпус» включает следующие этапы:

- изготавливается заготовка детали «Корпус» методом прямого лазерного нанесения;

- выполняется контроль геометрии заготовки на ATOS до термической обработки;

- производится термическая обработка заготовки для снятия напряжений вместе с подложкой;

- удаляется подложка;

- выполняется контроль геометрии заготовки на ATOS после термической обработки и удаления подложки.

2.1 Материалы и образцы

Исходным материалом для прямого лазерного нанесения выбрана МПК из жаропрочного сплава на основе никеля XH50BMTЮБ фракцией 40-150 мкм.

Химический состав МПК представлен в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Химический состав МПК из жаропрочного сплава XH50BMTЮБ

	Mn	Cr	Si	Ni	Fe	Al	B	Ti	Мо	Nb	Ce	С	S	Р	W
TY136-225- 2019	≤0,5	32,0-35,0	≤0,4	Основа	54	0,5-1,1	≤0,008	0,5-1,1	2,3-3,3	0,5-1,1	≤0,03	$\leq 0, 1$	≤0,01	≤0,015	4,3 - 5,3

На начальном этапе выполняется входной контроль МПК, включающий в себя следующие методики:

1. Гранулометрический состав МПК определяется методом сухого просеивания по ГОСТ 18318 [41] на наборе сит фирмы Retsch (Германия) с размерами ячеек 40 и 150 мкм по ГОСТ 6613 [42], на виброгрохоте AS200 control фирмы Retsch (Германия); 2. Оценка формы частиц проводится в соответствии с ГОСТ 25849 [38].

3. Отсутствие посторонних включений в исследуемой МПК определяется визуально в процессе ситового анализа путем осмотра остатка на сетке;

4. Текучесть и насыпная плотность МПК определяется при помощи калиброванной воронки (прибора Холла), изготовленной из стали марки 12Х18Н10Т с выходным диаметром 2,5 мм. Масса порции (навески) для одного испытания на текучесть составляет 50±0,1г. Текучесть МПК определяется по ГОСТ 20899 [43], насыпная плотность по ГОСТ 19440 [44];

5. Влажность МПК определяется гравиметрическим методом определения воды по ГОСТ 18317 [45], основанном на высушивании в печи при температуре 105-110 °С навески пробы порошка, взятого в воздушно-сухом состоянии до постоянной массы. Сушка производится в сушильном шкафу Binder ED115 (Германия). Взвешивание пробы выполняется на весах AND HR-100 AZG (Япония) с ценой деления 0,0001 г.

6. Подготовка шлифов для металлографических исследований производится посредством заливки МПК в эпоксидную смолу. В предварительно напиленные металлические трубки диаметром 10 мм, толщиной стенки 1 мм и высотой 10 мм заливается эпоксидная смола, после чего засыпается МПК. Сушка эпоксидной смолы длится двое суток. Процедура шлифовки и полировки всех образцов проходит вручную. Шлифовка производится наждачной бумагой в следующем порядке: Р240, Р400, Р600, Р1000, Р1500, Р2000, Р2500. Полировка производится с помощью войлочного диска и пасты ГОИ ГОСТ 19113 [46]. Шлифы с МПК исследуются на электронном микроскопе Tescan VEGA3 LM (производства Чехии) с модулем Oxford instruments X-Max.

2.2 Методика прямого лазерного нанесения

Прямое лазерное нанесение производится на гибридном комплексе прямого лазерного нанесения и механической обработки - производства ИЛиСТ СПбГМ-ТУ (Россия, г.Санкт-Петербург). Гибридный комплекс с числовым программным управлением (ЧПУ) класса точности П по ГОСТ 8 [47] модели ГК-01 предназначен для комплексной обработки деталей сложной формы. Внешний вид комплекса представлен на рисунке 2.2.



Рисунок 2.2 – Внешний вид гибридного комплекса ГК-01

Перечень составных частей и общий вид сверху представлены в таблице 2.2 и на рисунке 2.3.

Поз.	Наименование	Кол.
1.	Бак для сбора стружки	1
2.	Ленточный транспортер	1
3.	Бак СОЖ	1
4.	Чиллер для охлаждения стола	1
5.	Чиллер для охлаждения шпинделя	1
6.	Чиллер для охлаждения лазера	1
7.	Иттербиевый волоконный лазер	1
8.	Бак фильтрации СОЖ	1

Таблица 2.2 – Перечень составных частей гибридного комплекса ГК-01



Рисунок 2.3 – Общий вид комплекса сверху

Технические характеристики комплекса представлены в таблице 2.3.

	Наименование параметров	Значения
	Стол поворотный	
1.	Размеры рабочей поверхности, мм	Ø1100
2.	Количество Т-образных пазов	8
3.	Ширина паза, мм	18H8
4.	Диаметр центрального отверстия, мм	50H6
5.	Наибольшая частота вращения стола, мин ⁻¹	
	ось В	10
	ось С	350
6.	Наибольший крутящий момент, Нм	
	ось В	3000
	ось С	2900

Таблица 2.3 – Технические характеристики гибридного комплекса ГК-01

Продолжение таблицы 2.3

	Наименование параметров	Значения
7.	Угол поворота стола, град	
	В	140 (+45/-95)
	С	360
8.	Дискретность задания перемещения по осям В, С, мм	0,001
	Наибольшее расстояние от торца шпинделя до зеркала	600
	планшайбы, мм	000
9.	Наибольшая масса обрабатываемой детали, кг, не более	500
	Шпиндель	
10.	Конус шпинделя	HSK A100
11.	Число ступеней частот вращения шпинделя	Регулирование
		бесступенчатое
12.	Диапазон частот вращения шпинделя, мин ⁻¹	010000
13.	Номинальный крутящий момент на шпинделе, Нм	180
	Перемещения	
14.	Наибольшее программируемое перемещение по координа-	
	там, мм	
	X	1020
	Y	1395
	Z	794
15.	Дискретность задания перемещения по осям X, У, Z, мм	0,001
16.	Число управляемых осей координат	7
17.	Число одновременно управляемых осей координат	5
18.	Наибольшее усилие подачи по координатам Х, Ү, Ζ, Η	5000
19.	Диапазон рабочих подач по координатам X, Y, Z, мм/мин	110 000
20	Число ступеней рабочих подач	Регулирование
20.		бесступенчатое
21.	Скорость быстрого перемещения по координатам Х, Ү, Ζ,	15,15,10
	М/МИН	

Рабочим инструментом для прямого лазерного нанесения в гибридном комплексе ГК-01 является многоканальное сопло, используемое для подачи газопорошковой струи непосредственно в зону наплавки (рисунок 2.4). При прямом лазерном нанесении расплавленный метал защищается локально через сопло. Используемый защитный газ – Ar.

Методика изготовления образцов из МПК включает в себя 2 этапа:

1. Подбор стабильных режимов прямого лазерного нанесения. Подбор стабильных режимов производится опытным путем, посредством прямого лазерного нанесения цилиндрических заготовок Ø60мм.



Рисунок 2.4 - Многоканальное сопло в разрезе

Для этого разрабатывается управляющая программа с 30 слоями в один валик. При запуске программы выставляется скорость наплавки и расход МПК на питателе опытным путем. После отработки программы замеряется расстояние от среза сопла до рабочей точки и производится корректировка скорости и подачи МПК с целью исключения разницы расстояний до и после запуска программы. Когда достигается разница расстояний 0...-1 мм, считается режим стабильным. Пример заготовок со стабильным и нестабильным режимами представлен на рисунке 2.5.





Рисунок 2.5 - Цилиндрические заготовки: *а*) стабильный режим; *б*) нестабильный режим

Нестабильное формирование образца связано с неверно заданными параметрами расхода МПК, скорости наплавки или мощности лазерного излучения. Стоит отметить, что при отработке режима прямого лазерного нанесения на цилиндрической заготовке, расход МПК на питателе не должен превышать 70%. Это требуется для последующей регулировки подачи в сторону увеличения при изготовлении заготовки, за счет более быстрого охлаждения наплавляемой детали по сравнению с цилиндрической заготовкой.

2. Изготовление заготовок образцов для металлографических исследований. Для проведения металлографических исследований изготавливаются заготовки образцов на подобранных стабильных режимах с размерами 60x15x15мм.

3. После прямого лазерного нанесения, образцы подвергаются *термической обработке* для снятия напряжений. Термообработка образцов производится в муфельной печи по следующему режиму: закалка (1180±10)°C, 4ч., охлаждение на воздухе.

2.3 Металлографические исследования и механические испытания наплавленного материала

Металлографическое исследование изготовленных образцов производится на шлифах, изготовленных вдоль направления роста образцов в трёх сечениях: на расстоянии 10 мм от краев и по центральному сечению относительно длины образца, условное обозначение х-1, х-2, х-ц (рисунок 2.6).



Рисунок 2.6 – Схема вырезки образцов для металлографических исследований (на примере образца №1)

Травление шлифов производится в реактиве Васильева (CuSO₄ – 5г., H₂SO₄ - 1,4 мл., HCl -50 мл., H₂O – 40мл.).

Исследование структуры и спектральный анализ наплавленных зон исследуется на электронном микроскопе Tescan VEGA3 LM (производство Чехия) с модулем Oxford instruments X-Max. Измерение микротвердости зон лазерной наплавки проводится на микротвердомере "EMCO-TEST PrufmaSchinen GmbH" DuraScan-10 (производство Австрия).

Механические свойства определяются в долевом и поперечном направлениях. Выбранные направления позволяют исследовать зависимость полученных свойств от направления изготовления образцов.

Кратковременные свойства определяются по ГОСТ 1497 [48] на электромеханической испытательной настольной машине LFM-50 с точностью измерений 0,5%. При кратковременных испытаниях определяются такие параметры, как: σ_в, σ_{0,2}, δ, ψ.

Длительная прочность определяется по ГОСТ 9651 [49] на электромеханической испытательной напольной машине LFMZ-30 с точностью измерений 0,5%. Испытания проводятся на стандартных образцах с диаметром рабочей части 5мм при температуре T=800°C и нагрузке σ=18кгс/мм2.

Внешний вид заготовок образцов для механических испытаний после прямого лазерного нанесения представлен на рисунке 2.7



Рисунок 2.7 – Внешний вид заготовки образцов для механических испытаний

Эскиз заготовок образцов, с указанием расположения образцов для механических испытаний представлен на рисунке 2.8.



Рисунок 2.8 – Схема вырезки образцов

Вырезка заготовок образцов для механических испытаний производится электроэрозионным методом, после чего изготавливаются разрывные образцы посредством токарной обработки.

3 ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ИСХОДНЫХ МЕТАЛЛО-ПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ ИЗ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА ХН50ВМТЮБ

Качество исходных материалов является ключевым фактором, обеспечивающим требуемый уровень структуры и свойств изделий, получаемых из металломатричных материалов различными способами. Особую важность указанный фактор приобретает в процессах прямого лазерного нанесения металлов. Это связано, в первую очередь, с тем, что при прямом лазерном нанесении структура и свойства МПК будут оказывать прямое наследственное влияние на структуру и свойства сплавов, а также изделий из них, получаемых указанным способом. Как известно, в литейных технологиях структурная наследственность проявляется в системе «шихта-расплав-литое изделие» [50]. Закладка положительной структурной информации при этом может осуществляться, как в твердом (шихтовые материалы), так и в жидком (расплав на стадии подготовки к литью) состояниях. В аддитивной технологии прямого лазерного нанесения структурная наследственность будет проявляться в системе «МПК-расплав-изделие» (полученное прямым лазерным нанесением). В процессах прямого лазерного нанесения, из-за их специфики, устранить отрицательную структурную наследственность от МПК практически невозможно. В связи с этим, особое значение приобретают параметры качества исходных МПК, используемых в процессах прямого лазерного нанесения металлов.

3.1 Исследование качества металлопорошковой композиции производства ФГУП «ВИАМ»

МПК из жаропрочного сплава XH50BMTЮБ производства ФГУП «ВИ-AM», получают по технологии газовой атомизации и имеет фракцию 40-150 мкм. *Морфология частиц* представлена на рисунке 3.1.



Рисунок 3.1 - Морфология частиц МПК из жаропрочного сплава XH50BMTЮБ: *a*) - *c*) – поверхность частиц 2; *д*) - *e*) срез частиц

МПК имеет преимущественно сферическую и округлую формы, отмечается наличие многочисленных частиц брызгообразных форм до 4 шт/см² (рисунок 3.1 *в*).

На поверхности всех частиц присутствуют сателлиты, размерами 1-2 мкм (рисунок 3.1 *a*) - *д*)).

В сечении многих частиц обнаружены округлые поры размером до 50 мкм (рисунок 3.1 ∂), e)). Структура порошка имеет дендритное строение. Дендриты ориентированы в различных направлениях, ширина осей дендритов не превышает 1мкм (рисунок 3.1 ∂), e))

При проведении микроспектрального анализа *химического состава* выявлено полное его соответствие предъявляемым требованиям. Полученные значения химического состава представлены в таблице 3.1.

	Cr	Ni	Fe	Al	Ti	Mo	Nb	W
1	33,00	57,20	0,44	0,81	0,85	2,27	0,54	4,90
2	33,26	57,17	0,31	0,79	0,87	2,23	0,49	4,89
3	33,26	55,94	0,34	1,18	1,09	2,59	0,95	4,66
4	34,19	55,38	0,06	0,9	0,91	2,55	0,65	5,35
5	34,79	56,56	0,00	0,59	0,90	1,80	0,50	4,85
6	34,14	55,04	0,06	1,11	0,94	2,94	0,80	4,97
7	34,12	54,28	0,10	1,31	1,11	3,10	0,91	5,07
Ср.знач.	33,82	55,94	0,19	0,96	0,95	2,50	0,69	4,96
по ТУ	32.0-							
136-225-2019	35,0	основа	≤4	0,5-1,1	0,5-1,1	2,3-3,3	0,5-1,1	4,3 - 5,3

Таблица 3.1 - Химический состав частиц МПК из жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ, %

Для установления наследственности была изготовлена технологическая проба с помощью аддитивной технологии прямого лазерного нанесения и исследована структура полученного образца (рисунок 3.2).

Исследование структуры изготовленного образца выявило многочисленное содержание пор, до 11шт/см² и максимальным размером до 150 мкм, образующиеся в результате переноса из исходной МПК.



Рисунок 3.2 – Структура изготовленного по аддитивной технологии прямого лазерного нанесения образца из жаропрочного сплава XH50BMTЮБ

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

3.2 Исследование качества металлопорошковой композиции производства АО «Композит»

МПК из жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ получена по технологии центробежного распыления (PREP) и имеет фракцию 40-150 мкм. Для наиболее глубокого исследования было отобрано 5 партий МПК различных плавок.

Для обеспечения стабильности режимов прямого лазерного нанесения плюсовая фракция должна быть не более 5%, а минусовая не более 10%, что указано в технических условиях ТУ 136-225-2019 и требованиях к материалам, применяемым к гибридному комплексу ГК-01.

Гранулометрический анализ показал, что размеры частиц соответствуют требуемому диапазону фракции 40-150 мкм (таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Гранулометрический состав исследуемых партий МПК из жаропрочного сплава XH50BMTЮБ

	Гранулометрич	еский состав, %
№ партии	плюсовая фракция (более 150 мкм)	минусовая фракция (менее 40 мкм)
1	отсутствует	4
2	0,5	3,9
3	1,8	3,5
4	3,9	3,0
5	0,4	0,3
По ТУ 136-225-2019	не более 5 %	не более 10 %

МПК должна обладать текучестью, для бесперебойной подачи по транспортирующим каналам в зону роста при прямом лазерном нанесении. По результатам замеров получено, что все исследуемые партии имеют текучесть в 2 раза выше предъявляемых требований (таблица 3.3)

Таблица 3.3 – Результаты исследований текучести, насыпной плотности и влажности МПК из жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ

№ партии	Текучесть, сек	Насыпная	Влажность, %
		плотность,	
		г/см3	
1	14,6	4,91	0,001
2	14,5	4,91	0,04
3	14,6	4,94	0,03
4	14,7	4,91	0,04
5	14,5	4,87	0,04
По ТУ 136-225-2019	≤27,5	4,96±10%	≤0,1

Дополнительно, для наиболее глубокого исследования качества МПК, выполнены работы по замеру текучести, насыпной плотности и содержанию влаги. Из таблицы 3.3 видно, что МПК исследуемых партий соответствуют предъявляемым требованиям.

При высоком содержании влаги в МПК, материал может окисляться, образуя на поверхности тугоплавкие окислы, негативно влияющие на структуру материала. Также при прямом лазерном нанесении возможно образование пористости в выращенном материале, в результате чего оценка содержании влаги является одной из ключевых.

С целью исключения попадания посторонних включений в изготавливаемый материал, выполнен *визуальный контроль включений* в МПК, без применения увеличительных приборов в процессе ситового анализа путем осмотра остатка на сетке. Посторонних включений в МПК не обнаружено.

При оценке *морфологии частиц* МПК, с использованием электронного микроскопа, установлено, 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 (рисунок 3.3 *в)* и *д*)). В партии №3 – до 2 шт/см² округлых частиц, в партии №5 – до 1 шт/см² со стержневой формой и до 2 шт/см² частиц с брызгообразной формой.

Для оценки структуры и наличия внутренних дефектов изготавливались шлифы образцов с МПК, залитой в эпоксидную смолу. При исследовании внутренних дефектов не обнаружено. Частицы как на поверхности, так и на срезе имеют дендритную структуру (рисунок 3.4).



Рисунок 3.3 - Форма частиц МПК из жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ:

а) - партия 1; *б*) - партия 2; *в*) - партия 3; *г*) - партия 4; *д*) - партия 5.



Рисунок 3.4 – Структура частиц МПК из жаропрочного сплава XH50BMTЮБ: *а)* на поверхности частиц; *б)* на сечении частицы

Размеры обнаруженных дендритов сопоставимы с размерами частиц МПК. По результатам *микроспектрального анализа* химического состава установлено, что химический состав соответствует установленным требованиям (таблицы 3.4-3.8).

№ замера	Mn	Cr	Si	Ni	Fe	Al	В	Ti	Mo	Nb	Ce
1	0,09	32,92	0,00	55,88	0,35	1,18	0,00	0,93	2,35	0,60	0,00
2	0,15	32,89	0,00	54,99	0,35	1,18	0,00	0,94	2,98	0,66	0,00
3	0,19	32,77	0,00	56,12	0,28	1,10	0,00	0,92	2,87	0,71	0,02
4	0,20	33,01	0,00	55,16	0,31	1,03	0,00	0,89	2,80	0,61	0,00
5	0,26	33,51	0,00	56,85	0,32	0,91	0,00	1,00	2,05	0,45	0,00
6	0,20	33,28	0,00	55,81	0,45	1,20	0,00	0,92	2,24	0,63	0,00
7	0,26	33,05	0,00	54,52	0,39	1,23	0,00	0,98	3,00	0,69	0,07
8	0,10	33,62	0,00	56,21	0,22	0,84	0,00	0,90	2,05	0,42	0,00
9	0,11	33,53	0,00	55,84	0,32	1,00	0,00	0,90	2,05	0,47	0,07
10	0,17	33,00	0,00	56,01	0,39	1,20	0,00	0,93	2,05	0,74	0,14
Ср.знач.	0,19	33,16	0,00	55,60	0,34	1,09	0,00	0,93	2,44	0,60	0,03
по ТУ 136-	<0.5	32,0-	<0.4	осно-	<1	0,5-	≤0,0	0,5-	2,3-	0,5-	<0.03
225-2019	<u>≥</u> 0,3	35,0	≥0,4	ва	<u>_</u> 4	1,1	08	1,1	3,3	1,1	<u>>0,03</u>

Таблица 3.4 - Химический состав частиц МПК партии №1, %

Таблица 3.5 - Химический состав частиц МПК партии №2, %

№ замера	Mn	Cr	Si	Ni	Fe	Al	B	Ti	Мо	Nb	Ce
1	0,10	33,06	0,00	55,05	0,27	1,21	0,00	0,9	2,7	0,46	0,05
2	0,12	32,77	0,00	54,84	0,42	1,2	0,00	0,9	2,82	0,78	0,00
3	0,08	32,92	0,00	55,88	0,39	0,96	0,00	0,86	2,73	0,58	0,00
4	0,08	32,83	0,00	55,65	0,30	0,88	0,00	0,81	2,69	0,57	0,08
5	0,13	33,73	0,00	55,46	0,31	0,89	0,00	0,87	2,33	0,72	0,00

54

№ замера	Mn	Cr	Si	Ni	Fe	Al	В	Ti	Мо	Nb	Ce
6	0,11	32,92	0,00	56,00	0,29	1,15	0,00	0,89	2,99	0,61	0,02
7	0,18	32,89	0,00	54,81	0,23	1,07	0,00	0,76	2,91	0,62	0,00
8	0,16	32,58	0,00	54,89	0,27	1,12	0,00	0,82	2,80	0,62	0,00
9	0,08	32,81	0,00	54,31	0,33	1,23	0,00	0,98	3,07	0,77	0,00
10	0,18	33,35	0,00	54,83	0,34	1,01	0,00	0,83	2,82	0,70	0,04
Ср.знач.	0,12	32,99	0,00	55,17	0,32	1,07	0,00	0,86	2,79	0,64	0,02
по ТУ 136-	<0.5	32,0-	<0.4	осно-	<10	0,5-	≤0,0	0,5-	2,3-	0,5-	<0.03
225-2019	≥0, 5	35,0	≥ 0,4	ва	≥ 4,0	1,1	08	1,1	3,3	1,1	≥0,03

Продолжение таблицы 3.5

Таблица 3.6 - Химический состав частиц МПК партии №3, %

№ замера	Mn	Cr	Si	Ni	Fe	Al	В	Ti	Мо	Nb	Ce
1	0,04	32,99	0,00	54,71	0,39	1,18	0,00	1,00	2,90	0,76	0,00
2	0,18	33,05	0,00	55,76	0,30	1,16	0,00	0,91	2,59	0,60	0,04
3	0,09	32,70	0,00	54,93	0,37	1,14	0,00	1,72	2,43	0,61	0,00
4	0,12	33,30	0,00	55,77	0,34	1,01	0,00	0,82	2,73	0,66	0,00
5	0,11	33,05	0,14	55,38	0,33	0,79	0,00	0,85	2,27	0,97	0,07
6	0,09	33,18	0,00	55,87	0,31	1,11	0,00	0,89	2,71	0,66	0,00
7	0,15	32,44	0,00	55,59	0,39	1,26	0,00	0,92	2,82	0,60	0,01
8	0,09	32,73	0,00	55,02	0,35	1,25	0,00	0,97	2,86	0,69	0,05
9	0,16	32,10	0,00	55,08	0,55	1,15	0,00	0,95	2,48	0,74	0,00
10	0,13	33,60	0,00	55,46	0,42	0,87	0,00	0,81	2,85	0,91	0,00
Ср.знач.	0,12	32,91	0,01	55,38	0,38	1,09	0,00	0,98	2,66	0,72	0,02
по ТУ 136-	<05	32,0-	<0.4	осно-	<10	0,5-	≤0,0	0,5-	2,3-	0,5-	<0.03
225-2019	<u> </u>	35,0	<u>_</u> 0,4	ва	_4,0	1,1	08	1,1	3,3	1,1	<u>_0,03</u>

Таблица 3.7 - Химический состав частиц МПК партии №4, %

№ замера	Mn	Cr	Si	Ni	Fe	Al	B	Ti	Мо	Nb	Ce
1	0,12	33,22	0,00	56,03	0,39	1,06	0,00	0,92	2,60	0,59	0,00
2	0,15	33,47	0,00	56,44	0,62	1,01	0,00	0,92	2,34	0,52	0,00
3	0,14	32,85	0,00	55,11	0,33	1,13	0,00	0,89	2,85	0,54	0,06
4	0,07	32,54	0,00	54,88	0,37	1,31	0,00	0,95	2,90	0,69	0,02
5	0,14	33,68	0,00	56,80	0,37	0,90	0,00	0,99	2,27	0,57	0,00
6	0,07	32,98	0,00	55,61	0,40	1,16	0,00	0,90	2,72	0,60	0,04
7	0,08	32,80	0,00	54,91	0,36	1,23	0,00	0,91	2,91	0,73	0,00
8	0,10	32,79	0,00	54,70	0,31	1,23	0,00	0,91	2,90	0,65	0,00
9	0,14	33,50	0,00	56,51	0,35	0,96	0,00	0,91	2,35	0,45	0,05
10	0,16	33,19	0,00	55,84	0,30	1,15	0,00	1,09	2,58	0,61	0,05
Ср.знач.	0,12	33,10	0,00	55,68	0,38	0,99	0,00	0,94	2,64	0,60	0,02
по ТУ 136- 225-2019	≤0,5	32,0- 35,0	≤0,4	осно- ва	≤4,0	0,5- 1,1	≤0,0 08	0,5- 1,1	2,3- 3,3	0,5- 1,1	≤0,0 3

№ замера	Mn	Cr	Si	Ni	Fe	Al	B	Ti	Мо	Nb	Ce
1	0,17	33,09	0,00	56,38	0,30	1,06	0,00	0,92	2,50	0,59	0,00
2	0,15	33,16	0,00	55,63	0,36	1,12	0,00	1,02	2,67	0,72	0,02
3	0,14	32,81	0,00	55,78	0,33	1,19	0,00	0,90	2,63	0,61	0,02
4	0,13	32,82	0,00	55,90	0,29	1,16	0,00	0,96	2,65	0,61	0,05
5	0,16	33,18	0,00	56,51	0,39	0,94	0,00	0,83	2,39	0,52	0,01
6	0,14	33,29	0,00	55,53	0,35	1,02	0,00	0,89	2,76	0,68	0,01
7	0,14	32,72	0,00	54,72	0,36	1,22	0,00	0,93	3,08	0,73	0,00
8	0,15	32,97	0,00	55,65	0,31	1,08	0,00	0,90	2,71	0,63	0,00
9	0,18	33,15	0,00	55,54	0,41	1,25	0,00	0,95	2,31	0,54	0,07
10	0,11	32,80	0,00	54,90	0,39	1,03	0,00	1,01	2,87	0,87	0,00
Ср.знач.	0,15	32,99	0,00	55,65	0,35	1,10	0,00	0,93	2,66	0,65	0,02
по ТУ 136- 225-2019	≤0,5	32,0- 35,0	≤0,4	осно- ва	≤4,0	0,5- 1,1	≤0,0 08	0,5- 1,1	2,3- 3,3	0,5- 1,1	≤0,03

Таблица 3.8 - Химический состав частиц МПК партии №5, %

На рисунках 3.5-3.6 представлены карты распределения химических элементов на частицах МПК из жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ. Установлено, что во всех частицах наблюдается равномерное распределение фазовых составляющих.



Рисунок 3.5 - Карта распределения основных элементов в частицах МПК партии №1



Рисунок 3.6 - Карта распределения основных элементов в частицах МПК партии №2

Остальные химические элементы в частицах МПК из жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ определили по методикам аналитической химии. Результаты представлены в таблице 3.9:

№ партии МПК	С	S	Р	W
1	0,0438	0,0044	0,011	5,06
2	0,0482	0,0047	0,012	4,60
3	0,0514	0,0062	0,011	4,36
4	0,0492	0,0063	0,011	4,51
5	0,0482	0,0058	0,010	4,53
по ТУ 136-225-2019	≤0,1	≤0,01	≤0,015	4,3 - 5,3

Таблица 3.9 - Химический состав, %

По полученным результатам химического анализа, МПК из жаропрочного сплава XH50BMTЮБ производства АО «Композит» соответствует всем предъявляемым требованиям.

Выводы по главе 3

1. Проведены сравнительные исследования МПК из жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ, полученных различными способами: газовой атомизацией (производства ФГУП «ВИАМ») и центробежным распылением (производства АО «Композит»);

2. Установлено наследственное влияние структуры МПК, заключающееся в переносе дефектов структуры частиц в материал, полученный по аддитивной технологии прямого лазерного нанесения. Данное явление наиболее ярко выражено при исследовании МПК производства ФГУП «ВИАМ», содержащей многочисленные поры в структуре частиц, которые в последующем переносятся в структуру наплавленного материала и образуют недопустимые дефекты;

3. При исследовании 5 партий МПК производства АО «Композит» установлено, что все партии соответствуют предъявляемым требованиям и превосходят по качеству МПК из жаропрочного сплава ЭП648 производства ФГУП «ВИАМ». Структура материала не имеет внутренних дефектов, что положительно сказывается на структуру наплавленного материала.

По результатам исследований, МПК производства АО «Композит» рекомендована для использования в дальнейших исследованиях.

4 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО НАНЕСЕНИЯ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУК-ТУРУ И СВОЙСТВА ОБРАЗЦОВ ИЗ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА ХН50ВМТЮБ

4.1 Исследование влияния параметров процесса прямого лазерного нанесения на структуру и свойства образцов из жаропрочного сплава XH50BMTЮБ

В связи с отсутствием в установках прямого лазерного нанесения системы слежения расстояния от среза сопла до зоны прямого лазерного нанесения, перед изготовлением образцов для металлографических исследований проводится подбор стабильных режимов.

Подбор стабильных режимов производился опытным путем, посредством изготовления цилиндрических заготовок Ø60мм. Для этого создается управляющая программа с 30 слоями в один валик. При запуске программы выставлялась скорость наплавки и расход МПК на питателе опытным путем. После отработки программы замеряется расстояние от среза сопла до рабочей точки и производится корректировка скорости наплавки и подачи МПК с целью исключения разницы расстояний до и после запуска программы. Когда достигается разница расстояний 0...-1 мм, считается режим стабильным. При отработке режима прямого лазерного нанесения на цилиндрической заготовке, расход МПК на питателе не должен превышать 70%. Это требуется для последующей регулировки подачи в сторону увеличения при изготовлении заготовки, за счет более быстрого охлаждения изготовкой.

На рисунке 4.1 представлены примеры цилиндрических образцов со стабильным и нестабильным режимами. При стабильном режиме поверхность формируется равномерно, не имея различных дефектов. При нестабильном режиме происходит нарушение геометрии. Причиной нестабильного формирования являются перегрев образца или нестабильность расстояний от среза сопла до рабочей точки в результате неверно заданных параметров скорости и расхода МПК.



Рисунок 4.1 - Цилиндрические заготовки: *а)* стабильный режим; *б)* нестабильный режим

Таким образом, в результате подбора высокопроизводительных стабильных режимов прямого лазерного нанесения, получено 4 режима со скоростями наплавки 40 мм/с (таблица 4.1).

Таблица 4.1 - Высокопроизводительные стабильные режимы прямого лазерного нанесения из МПК жаропрочного сплава ХН60ВМТЮБ

Параметр режима	Значение параметра					
Номер образца	№1.1	№1.2	№1.3	№1.4		
Мощность лазерного излучения Рли, Вт	1000	1200	1400	1600		
Диаметр пятна лазера d, мм	2,7					
Расход транспортирующего газа С, л/мин	10					
Расход МПК, г/мин	52	51	50	49		
Скорость наплавки υ, мм/сек	40					
Шаг слоя z, мм	0,4					
Расстояние между центрами валиков h, мм	1,6					

Процесс изготовления образцов для металлографических исследований по аддитивной технологии прямого лазерного нанесения представлен на рисунке 4.2.

В процессе прямого лазерного нанесения, при визуальном контроле образование дефектов не выявлено, образцы росли стабильно. Поверхность образцов серебристого цвета, что подтверждает достаточность локальной защиты инертным газом – Ar.



Рисунок 4.2 – Процесс изготовления образцов для металлографических исследований по аддитивной технологии прямого лазерного нанесения

Из полученных прямоугольных заготовок образцов для металлографических исследований вырезались образцы с отступом 15 мм от краев и из центральной части. Схема вырезки образцов представлена на рисунке 4.3.



Рисунок 4.3 – Схема вырезки образцов для металлографических исследований (на примере образца №1.1)

При *макроанализе* полированных шлифов без травления наибольшее количество несплошностей в виде пор и несплавлений обнаружено в материале образца №1.1. При внешнем осмотре шлифов обнаружено (рисунок 4.4):

- в образце №1.1- несплавления, расположенные по всей высоте образца в виде строчек по границам валиков (рисунок 4.4 *a*));



Рисунок 4.4 - Распределение дефектов в материале образцов до травления

- в образце №1.2 - с одного края (2-1) имеется зона несплавлений со стороны подложки, на остальной поверхности шлифов наблюдаются более мелкие несплавления, распределенные по всей площади и ориентированные в строчки по границам валиков. Наименьшее количество дефектов обнаружено в центральном сечении образца - 2-ц (рисунок 4.4 б));

- в образце №1.3 - незначительное количество мелких пор и несплавлений. Наибольшее количество дефектов наблюдается у одного края образца - 3-1 (рисунок 4.4 *в*));

- в образце №1.4 имеются единичные мелкие поры и несплавления (рисунок 4.4 *г*)).

Макроструктура материала образцов после травления представлена на рисунке 4.5.



Рисунок 4.5 - Макроструктура материала образцов после травления: *а)* режим 1.1; *б)* режим 1.2; *в)* режим 1.3; *г)* режим 1.4

Максимальные размеры обнаруженных дефектов сведены в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 - Вид и максимальный размер дефектов, обнаруженных в материале образцов

№ образца	Сечение	Максимальны	Микротвердость,			
		рыхлота	пора, Ø	несплавление	НV _{0,1/5} , МПа	
				(длина)		
1 1	1-1	0,19x0,33	0,04	-		
1.1	1-ц	0,21x0,47	-	0,26	272309	
	1-2	0,1x0,25	-	0,38		
1.2	2-1	0,03x0,13	0,005	0,1		
1.2	2-ц	0,04x0,13	0,07	0,09	279309	
	2-2	0,04x0,09	0,05	0,4		

№ образца	Сечение	Максималы	Микротвердость,			
		рыхлота	пора, Ø	несплавление	HV _{0,1/5} , МПа	
				(длина)		
12	3-1	0,05x0,09	0,05	0,2		
1.5	3-ц	0,03x0,16	0,05	0,16	279301	
	3-2	0,05x0,09	0,06	0,43		
1 /	4-1	-	0,1*	0,2*		
1.4	4-ц	-	0,07*	0,15*	272309	
	4-2	0,03x0,11*	0,09*	0,5*		

Продолжение таблицы 4.2

Рыхлоты и поры, обозначенные *, являются единичными. Обнаруженные рыхлоты на образцах 1.2-1.4 расположены в нижней части образцов и находятся в жертвенном слое, который в дальнейшем удаляется

Основная масса пор в материале образца №1.4 имеет диаметр до 0,02мм.

Зависимость размеров обнаруженных дефектов от мощности лазерного излучения представлена на графике (рисунок 4.6).



Рисунок 4.6 – График зависимости размеров дефектов от мощности лазерного излучения

Установлено, что размеры пор увеличиваются с ростом мощности лазерного излучения. Увеличение размеров пор, связано с объединением более мелких пор за счет увеличения скорости перемешивания ванны расплава. Однако, размеры площадей, обнаруженных рыхлот и несплавлений значительно уменьшаются с увеличением мощности лазерного излучения, что свидетельствует об увеличении размеров ванны расплава и заполнении пустот между наплавляемыми валиками.

При микроанализе шлифов без травления подтверждено, что в материале всех образцов имеются несплошности в виде пор и несплавлений с размерами, указанными в таблице 4.2 (рисунки 4.7 – 4.10).



Рисунок 4.7 - Несплавления в образце №1.1: *а*) в верхней части; *б*) и *в*) в центральной части; *с*) на боковой поверхности



Рисунок 4.8 - Пористость и несплавления в образце №1.2: *а)* в верхней части; *б)* в центральной части



Рисунок 4.9 - Пористость и несплавления в образце №1.3: *а)* в верхней части; *б) - г)* в центральной части



Рисунок 4.10 - Пористость и несплавления в образце №1.4: *а)* несплавление; *б)* пористость

При сравнении микроструктуры материала образцов после травления установлено:

- в микроструктуре всех образцов просматривается трековая структура, типичная для материалов, полученных по аддитивной технологии прямого лазерного нанесения (рисунок 4.11);



Рисунок 4.11 - Микроструктура материала по ширине образцов: *а*) образец №1.2; *б*) образец №1.4

- треки представляют собой закристаллизовавшиеся ванны расплава, имеющие в поперечном срезе форму рыбьей чешуи. Высота трека (шаг слоя z) в образцах составляет 0,39...0,44мм, расстояние между соседними треками h - 1,67...1,95мм. Максимальная ширина треков наблюдается на образце №1.4;

- выявлена закономерность изменения микроструктуры от мощности лазерного излучения: чем выше мощность, тем более грубая микроструктура формируется в образцах, из-за различных скоростей охлаждения формируемого материала (рисунок 4.12);



Рисунок 4.12 - Микроструктура материала по ширине образцов: *а)* образец №1.1; *б)* образец №1.2; *в)* образец №1.3; *г)* образец №1.4

на образце №1.1 максимальная длина зерен составляет 250 мкм, образце
№ 1.2 – 400 мкм, образце № 1.3 – 500 мкм и образце № 1.4 – 700 мкм. Описанная

зависимость размера зерен от мощности лазерного излучения представлена на рисунке 4.13;



Рисунок 4.13 – График зависимости размера зерен от мощности лазерного излучения

- в образцах №1.3 и 1.4 - в центральной зоне треков наблюдаются вытянутые крупные субзерна с преимущественной долевой ориентировкой (рисунки 4.12 и 4.14);

- на образце №1.4 после травления в сечениях 4-1 и 4-ц обнаружены несплошности в виде трещин по границам зерен, расположенные в центральной части треков (рисунок 4.15). Трещина с максимальной длиной ~2,3мм наблюдается у верхнего торца образца в сечении 4-1. Внешний вид поверхности шлифа после переполировки образца (снятия травления) на окиси хрома представлен на рисунке 4.15 *а*). Кроме трещины у верхнего торца, обнаружены мелкие трещины в центральной части шлифа, расположенные ближе к одному краю (рисунок 4.15 *б*)).







Рисунок 4.15 - Трещины в центральной части треков на образце №1.4, Р_{ЛИ} = 1600Вт: *а*) образец после полировки; *б*) образец после травления

С целью определения причины возникновения трещин, был проведен микроспектральный анализ. Микроспектральный анализ, проведенный на электронном микроскопе, показал, что в трещинах содержится повышенное количество кислорода, свидетельствующее о наличии окислов (рисунок 4.16, таблица 4.3).





Рисунок 4.16 - Картирование химического состава в зоне несплошности

Спектр 1	Bec, %	Спектр 2	Bec, %	Спектр 3	Bec, %	Спектр 4	Bec, %	Спектр 5	Bec, %
С	20,98	С	21,24	С	22,73	Ti	0,82	Al	1,07
0	14,52	0	13,8	0	26,92	Cr	32,97	Ti	0,81
Al	0,21	Al	0,34	Si	9,3	Ni	58,02	Cr	32,8
Si	5	Si	4,04	S	1,19	Мо	2,44	Ni	56,46
Р	0,21	Ti	3,43	Ti	1,33	W	5,75	Nb	0,46
S	0,67	Cr	16,18	Cr	8,02	Сумма:	100	Mo	2,7
Ti	2,28	Ni	20,64	Ni	10,25			W	5,7
Cr	17,75	Nb	7,26	Nb	4,41			Сумма:	100
Ni	23,58	Mo	2,92	W	15,84				
Nb	5,31	W	10,15	Сумма:	100				
W	8,2	Сумма:	100			-			
Ti	1,29								
Сумма:	100								

Таблица 4.3 - Содержание химических элементов в указанных точках, %

Окислы образовались в результате перегрева металла за счет избыточного тепловложения и его остывания вне зоны локальной защиты инертным газом - Ar в процессе прямого лазерного нанесения.

Полученные результаты замеров микротвердости материала образцов приведены в таблице 4.2. Микротвердость материала всех образцов практически одинакова и составляет HV_{ср} ~ 291 МПа.

При опробовании изготовления образцов по аддитивной технологии прямого лазерного нанесения на полученных режимах, не успевал формироваться должным образом контур криволинейной поверхности и в результате чего на углах, при смене направления движения происходил его срыв и последующую наплавку выполнить было невозможно, в связи с этим было решено отрабатывать режимы с уменьшенными скоростями наплавки. Отработанные высокопроизводительные режимы прямого лазерного нанесения применимы к изготовлению «жертвенного слоя» и массивных частей заготовок деталей. Лучший режим №1.3 с мощностью лазерного излучения 1400Вт, так как при прямом лазерном нанесении металла в материале образуется наименьшее количество дефектов и отсутствуют трещины. Также, данный режим является высокопроизводительным.
По результатам подбора *режимов прямого лазерного нанесения партии* №2 были получены 8 режимов, которые представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 - Режимы прямого лазерного нанесения для образцов партии

No2

Параметр режима лазерного	Зн	ачение	параме	гра прям	мого лаз	зерного	нанесен	ния
нанесения	Nº1	N <u>∘</u> 2	N <u>∘</u> 3	N <u>∘</u> 4	N <u>⁰</u> 5	Nº6	№ 7	N <u>⁰</u> 8
Мощность лазерного излучения	1000	1200	1400	1600	1000	1200	1400	1600
Рли, Вт	1000	1200	1400	1000	1000	1200	1400	1000
Диаметр пятна лазера d, мм				2	.,7			
Расход транспортирующего га-		10						
за С, л/мин	10							
Расход МПК, г/мин	35	33	30	29	35	33	30	29
Скорость наплавки υ, мм/сек	20							
Шаг слоя z, мм	0,4							
Расстояние между центрами		16 14						
валиков h, мм		1	,0			1	, 	

Внешний вид поверхностей образцов представлен на рисунке 4.17.

Уменьшение шага слоя позволило снизить шероховатость поверхности образцов. Боковая поверхность образцов партии №2 с расстоянием между центрами валиков в 1,4 мм при визуальном контроле имеет меньшую шероховатость поверхности, по сравнению чем с расстоянием между центрами валиков в 1,6 мм. На образце №4, изготавливаемом с мощностью лазерного излучения 1600Вт и расстоянием между центрами валиков в 1,6 мм наблюдается нестабильное формирование поверхности, связанное с перегревом и окислением металла.

Металлографическое исследование проводилось аналогично методике для образцов партии №1.

При *макроанализе* полированных шлифов без травления в сечениях 1-1 и 1ц образца №1 наблюдается мелкая пористость, выстроившаяся в строчки (рисунок 4.18 *a*)), на остальных образцах дефектов не было обнаружено.



Рисунок 4.17 - Внешний вид поверхностей образцов партии №2 (вид сбоку)

На исследуемых образцах второй партии, при макроанализе обнаружено значительно меньше дефектов в виде пор и рыхлот, чем на образцах партии 1 (высокопроизводительные режимы). Это связано с увеличением перекрытия валиков и уменьшением скорости наплавки.





Целенаправленное увеличение перекрытия подтвердило уменьшение количества дефектов за счет заполнения пустот между наплавляемыми валиками. При использовании наименьшей мощности лазерного излучения возможно будет получить более мелкозернистую структуру наплавленного материала, что в свою очередь положительно скажется на однородности свойств материала.

Макроструктура образцов представлена на рисунках 4.19 и 4.20. Структура материала всех образцов имеет слоистое строение, внутри слоя строение «чешуй-чатое». В макроструктуре всех образцов наблюдаются вытянутые зерна.

При макроанализе выявлена зависимость размера зерен от мощности лазерного излучения и расстояния между центрами наплавляемых валиков (рисунок 4.21):

- с увеличением мощности лазерного излучения увеличиваются размеры зерен; Направление Выращивания

Направление Выращивания



Рисунок 4.19 - Макроструктура образцов, полученных по аддитивной технологии прямого лазерного нанесения (партия 2)



Рисунок 4.20 - Макроструктура образцов, полученных по аддитивной технологии прямого лазерного нанесения (партия 2)



Рисунок 4.21 – График зависимости размера зерен от мощности лазерного излучения и изменения перекрытия

- с уменьшением расстояния между центрами валиков (увеличения перекрытия) также увеличиваются размеры зерен.

Данные явления связаны с увеличением нагрева наплавленного материала и уменьшением скорости охлаждения, способствующим росту зерен.

При микроанализе шлифов установлено:

- микроструктура материала всех образцов имеет дендритное строение и характерна для литого состояния материала (рисунки 4.22 и 4.23).

- в материале всех образцов имеются мелкие несплошности в виде рыхлот, пор и несплавлений (рисунок 4.24).

- в образце №1 наблюдается мелкая пористость в виде строчек длиной до 0,2 мм, которая была обнаружена ранее на рисунке 4.18 (рисунок 4.25).

- обнаруженная общая пористость материала образцов составляет: в образцах №1 и 2 до 0,02 мм, в образцах №3,4,5 до 0,015мм, в образцах №6,7,8 до 0,012 мм.



Рисунок 4.22 - Микроструктура образцов, полученных по аддитивной технологии прямого лазерного нанесения (партия 2)







Рисунок 4.24 - Дефекты в материале образцов партии 2: *a*) пористость (режим №1); *б*) пористость, несплавление (режим №4); *в*) пористость, несплавление (режим №1); *с*) пористость, несплавление (режим №7); *d*) рыхлота, пористость (режим №4); *е*) рыхлота, пористость (режим №5)



Рисунок 4.25 - Мелкие поры, выстроившиеся в строчки в материале образца №1, Р_{ЛИ} = 1000Вт, h = 1,6 мм

Максимальный размер единичных дефектов, обнаруженных в материале образцов, представлен в таблице 4.5. Обнаруженные рыхлоты расположены в жертвенном слое, который в дальнейшем удаляется.

Таблица 4.5 - Размеры дефектов и результаты замеров микротвердости в образцах партии №2

№ режима, Р _{ЛИ} , h	Сечение	Максимальный размер дефекта, мм			Микро-
		рыхлота	пора, Ø	несплавление	твердость,
				(длина)	HV _{0,1/5} , МПа
1, 1000Вт, 1,6 мм	1-1	-	0,04	-	
	1-ц	-	0,05	0,04; 0,13	301304
	1-2	0,06x0,07	0,03; 0,045	-	
2, 1200Вт, 1,6 мм	2-1	-	0,028; 0,05	0,1	
	2-ц	-	0,023	0,09	301325
	2-2	-	0,028	0,4	
3, 1400Вт, 1,6 мм	3-1	-	0,045	-	
	3-ц	-	0,015	-	293309
	3-2	0,006x0,029	0,015	-	
4, 1600Вт, 1,6 мм	4-1	0	0,015	0,030,08	
	4-ц	0,04x0,016	0,015	-	283317
	4-2	-	0,05	0,16	
5, 1000Вт, 1,4 мм	5-1	-	0,025	0,02	
	5-ц	-	0,030,04	0,03	286301
	5-2	-	0,020,05	0,020,08	
6, 1200Вт, 1,4 мм	6-1	-	0,019	0,045	
	6-ц	-	0,018	0,053	286325
	6-2	0,0460,051	0,04	0,086	
7, 1400Вт, 1,4 мм	7-1	-	0,012	0,04	
	7-ц	-	0,03	0,020,17	272293
	7-2	-	0,014	0,04	
8, 1600Вт, 1,4 мм		-	0,03	-	259286

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

График зависимости среднего размера обнаруженных пор в материале образцов представлен на рисунке 4.26.



Рисунок 4.26 - График зависимости среднего размера обнаруженных пор от мощности лазерного излучения

Установлено, что на режимах прямого лазерного нанесения с расстоянием между центрами валиков 1,4 и 1,6 мм происходит уменьшение размера пор с увеличением мощности лазерного излучение, однако, на мощности 1600Вт происходит их объединение в более крупные за счет увеличения размеров ванны расплава, интенсивности ее перемешивания, а также окисления.

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. В образцах 2,4,5,7,8 имеются единичные трещины и в центральной части (рисунки 4.27 – 4.31).



Рисунок 4.27 - Трещины в образце №1, Р_{ЛИ} = 1000Вт, h = 1,6 мм



Рисунок 4.28 - Трещины в образце №2, Рли = 1200Вт, h = 1,6 мм



Рисунок 4.29 - Трещины в образце №4 (поперечное сечение),

Р_{ЛИ} = 1600Вт, h = 1,6 мм



Рисунок 4.30 - Трещины в образце №6, Р_{ЛИ} = 1200Вт, h = 1,4мм: *а)* центральная зона; *б)* краевая зона



Рисунок 4.31 - Трещины в образце №8, Р_{ЛИ} = 1600Вт, h = 1,4мм: *а)* без травления; *б)* после травления

До травления обнаружена только одна трещина в образце №8 (рисунок 4.30).

4.2 Исследование влияния термической обработки на структуру и свойства образцов из жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ, полученных аддитивной технологией прямого лазерного нанесения металлов

Для отработки термической обработки выбраны режимы прямого лазерного нанесения №5 - 8 с расстоянием между центрами валиков 1,4 мм (таблица 4.6).

Таблица 4.6 - Режимы изготовления образцов отобранные для термической обработки

Параметр режима лазерного нанесения	Значение параметра прямого лазерного нанесения				
Номер образца	5	6	7	8	
Мощность лазерного излучения Р, Вт	1000	1200	1400	1600	
Диаметр пятна лазера d, мм		2,7	7		
Расход транспортирующего газа С, л/мин		10)		
Расход МПК, г/мин	35	33	30	29	
Скорость наплавки υ, мм/сек		20)		
Шаг слоя z, мм		0,4	4		
Расстояние между центрами валиков h, мм		1,4	4		

Термообработка образцов для снятия напряжений проводилась в муфельной печи по режиму: закалка (1180±10) °С, 4ч., охлаждение на воздухе.

При *макроанализе* полированных шлифов из термически обработанных образцов выявлено (рисунок 4.32):

- дефекты в термически обработанных образцах отсутствуют;

- аналогично образцам до термической обработки, выявлено увеличение размера зерна от мощности лазерного излучения.



Рисунок 4.32 - Макроструктура образцов после термической обработки

График зависимости размера зерен до и после термической обработки представлен на рисунке 4.33.



Рисунок 4.33 - График зависимости размера зерен от мощности лазерного излучения на образцах до и после термической обработки

При *микроанализе* шлифов установлено, что в материале всех образцов имеются мелкие несплошности в виде пор и несплавлений, аналогичные дефектам, обнаруженным в образцах до термической обработки. Диаметр пор в образцах №5 и 6 составляет до 0,015 мм, в образцах №7 и 8 до 0,012 мм. Максимальный размер единичных дефектов, обнаруженных в материале образцов представлен в таблице 4.7. Обнаруженная рыхлота находится в жертвенном слое, который в дальнейшем удаляется.

N⁰	Рли=, Вт	h, мм	Максимальный размер дефекта, мм			Микротвердость,			
образца							HV _{0,1/5} , МПа		
			рыхлота	пора,	несплавление		Среднее		
				Ø	(длина)		значение		
5	1000		0,024x0,06	0,040	0,045	334373	351,2		
6	1200	1.4	-	0,070	0,040	343363	357,0		
7	1400	1,4	-	0,013	0,060	353363	359,0		
8	1600		_	0,070	0,025	353373	365,0		

Таблица 4.7 - Максимальные размеры единичных дефектов

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 (рисунки 4.34 и 4.35 *г*))



Рисунок 4.34 - Трещина в образце №8 после термической обработки, $P_{\Pi H} = 1600 B {\rm T}, \, h = 1,4 \ {\rm MM}$

Микроструктура по ширине термически обработанных образцов представлена на рисунке 4.35.



Рисунок 4.35 - Микроструктура материала жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ

по ширине образцов после термической обработки

При микроанализе установлено, что на всех образцах после термической обработки трековой структуры не наблюдается (рисунок 4.36).



Рисунок 4.36 - Микроструктура образцов партии 2 после термической обработки

Исследуемая микроструктура представляет собой зерна γ-твердого раствора + упрочняющие фазы.

4.3 Исследование влияние структуры на механические свойства сплава XH50BMTЮБ, полученного по аддитивной технологии прямого лазерного нанесения металлов

Механическим испытаниям подвергнуты образцы, изготовленные по режимам 5, 6 и 7 (с мощностью лазерного излучения 1000Вт, 1200 Вт и 1400 Вт соответственно) и выполненной термической обработкой для снятия напряжений, так как содержат наименьшее количество дефектов.

Механические свойства определялись на стандартных образцах при комнатной температуре. Результаты испытаний приведены в таблице 4.8.

Анализируя данные таблицы 4.8, установлено:

- механические свойства образцов, полученных по режиму №5, практически одинаковы в долевом и поперечном направлении относительно направления роста при прямом лазерном нанесении;

- 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. Прочностные характеристики находятся примерно на одном уровне;

- на образцах, полученных по режиму №7, наблюдается значительное снижение свойств в поперечном направлении относительно долевого: $\sigma_{\rm B}$ 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 для сплавов ВХ4Л (литейная модификация ВХ4А) [51] и ВХ4А (ЭП648-ХН50ВМТЮБ), кроме предела текучести. По ТУ 14-1-3046-97 на прутки из сплава ВХ4А и предел текучести соответствует норме. Снижение уровня предела прочности и относительного удлинения наблюдается только на образцах режима №7 в поперечном направлении.

№ режима, Р _{ли} , h	Направление вырезки об- разцов	σ _в , кгс/мм ²	σ _{0,2} , κгс/мм ²	δ, %	Ψ, %	КСU, кгс*м/см ²
		101,3	56,8	31,8	32,8	10,6
	Долевое	103,1	58,3	35,7	32,3	10,4
5. $1000 P_{T}$: 1.4 Mag		101,5	56,8	33,4	31,6	10,0
<i>5</i> , 1000D1, 1,4 MM		104,6	56,6	33,7	32,4	9,1
	Поперечное	103,1	55,7	36,1	32,2	10,4
		103,2	56,4	35,0	34,8	9,1
		96,6	57,3	30,3	26,6	9,3
	Долевое	97,0	58,4	29,0	26,9	7,1
6.1200BT.14 MA		96,3	57,3	33,3	31,8	7,4
0, 1200D1, 1,4 MM	Поперечное	97,2	60,1	19,0	13,0	5,2
		95,6	55,7	25,2	19,0	7,9
		101,2	58,0	26,5	17,2	7,0
	Долевое	102,0	64,4	31,2	42,1	10,0
		96,5	58,3	34,3	40,0	11,2
7.1400BT: 1.4 MA		102,1	64,7	32,9	39,2	10,0
7, 1400D1, 1,4 MM		72,5	55,8	6,2	7,7	3,3
	Поперечное	89,6	56,5	12,8	15,7	3,9
		73,2	56,8	6,1	6,8	4,0
Справочные данные ВИАМ для сплава ВХ4Л		80-90	60-70	4-7	4-7	2-5
Справочные данные ВИАМ для сплава ВХ4А		95	65	25	-	≥2
Нормы ТУ 14-1-3046-97 на прут- ки из сплава ВХ4А		≥80	≥35	≥25	-	≥3,5

Таблица 4.8 - Механические свойства исследуемых образцов

Анализируя полученные результаты кратковременных свойств (рисунки 4.37 и 4.38) выявлено следующее:

- изломы всех образцов из жаропрочного сплава XH50BMTЮБ имеют хрупкое разрушение;

- при макроанализе на всех образцах наблюдается слабо выраженные границы сплавленных валиков.

Результаты испытаний на длительную прочность представлены в таблице 4.9 и на рисунке 4.39.



∂) долевой образец, режим №7,
 Р_{ЛИ} = 1400Вт, h = 1,4 мм



е) поперечный образец, режим №7,
 Р_{ЛИ} = 1400Вт, h = 1,4 мм



в) долевой образец, режим №6,
 Р_{ЛИ} = 1200Вт, h = 1,4 мм



г) поперечный образец, режим №6,
 Р_{ЛИ} = 1200Вт, h = 1,4 мм



а) долевой образец, режим №5, Р_{ЛИ} = 1000Вт, h = 1,4 мм



б) поперечный образец, режим №5,

 $P_{\Pi M} = 1000 B$ т, h = 1,4 мм

Рисунок 4.37 - Изломы разрывных образцов из жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ



а) долевой образец, режим №5, Р_{ЛИ} = 1000Вт, h = 1,4 мм



б) поперечный образец, режим №5,

 $P_{ЛИ} = 1000 B$ т, h = 1,4 мм



в) долевой образец, режим №6, Р_{ЛИ} = 1200Вт, h = 1,4 мм



г) поперечный образец, режим №6,

 $P_{ЛИ} = 1200B$ т, h = 1,4 мм



д) долевой образец, режим №7,
 Р_{ЛИ} = 1400Вт, h = 1,4 мм



е) поперечный образец, режим №7,

 $P_{ЛИ} = 1400 B$ т, h = 1,4 мм



	TT		Время до разрушения τ, ч		
№ режима, Р _{ли} , h резки образцов		№ 00- разца	фактическое	среднее	
		7	155 ⁵⁵		
	долевое	8	332 ³⁰	201,6	
5. 1000Dm 1 4 m		9	179^{20}		
5, 1000BT, 1,4 MM		16	163 ²⁵		
	поперечное	17	240^{50}	200,8	
		18	198^{05}		
		4	152^{00}		
	долевое	5	13315	156,8	
6. 1200Pm: 1.4 Mar		6	185^{20}		
0, 1200D1, 1,4 MM		13	104^{30}		
	поперечное	14	148 ¹⁵	123,1	
		15	116 ³⁰		
		1	231 ⁵⁰		
	долевое	2	223 ⁵⁵	222,9	
7. 1400Br: 1.4 MM		3	21300		
/; 1400BT; 1,4 MM		10	120^{30}		
	поперечное	11	142^{20}	133,25	
		12	13655		
Справочные данные ВИАМ для сплавов ВХ4Л и ВХ4А (ЭП648-ХН50ВМТЮБ) ≥100					

Таблица 4.9 - Длительная прочность исследуемых образцов

Анализируя полученные результаты длительных свойств (таблица 4.9 и рисунок 4.39) выявлено следующее:

- длительная прочность всех образцов превышает 100ч, что 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;

- при макроанализе на всех образцах наблюдается слабо выраженные границы сплавленных валиков.



а) долевой образец, режим №5, Р_{ЛИ} = 1000Вт, h = 1,4 мм



б) поперечный образец, режим №5,
 Р_{ЛИ} = 1000Вт, h = 1,4 мм



в) долевой образец, режим №6,
 Р_{ЛИ} = 1200Вт, h = 1,4 мм



г) поперечный образец, режим №6,
 Р_{ЛИ} = 1200Вт, h = 1,4 мм



∂) долевой образец, режим №7,
 Р_{ЛИ} = 1400Вт, h = 1,4 мм



е) поперечный образец, режим №7,
 Р_{ЛИ} = 1400Вт, h = 1,4 мм

Рисунок 4.39 - Изломы образцов из жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ после испытаний на длительную прочность

Полученные диаграммы по результатам исследований кратковременных и длительных свойств представлены на рисунках 4.40 и 4.41.



Рисунок 4.40 - Диаграмма сравнения кратковременных механических свойств



Рисунок 4.41 - Диаграмма сравнения длительных механических свойств

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 выращивания.

Выводы по главе

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 несплавлений. Аналогично происходит и с уменьшением расстояния между центрами наплавляемых валиков, за счет увеличения перекрытия.

На подобранных режимах прямого лазерного нанесения обнаружены только единичные дефекты. Диаметр пор в образцах, изготовленных по режимам №5 (Р_{ли}= 1000 Вт) и 6 (Р_{ли}= 1200 Вт) составляет до 0,015 мм, в образцах №7 (Р_{ли}= 1400 Вт) до 0,012 мм.

На образцах, прошедших термическую обработку (закалка), не было обнаружено ранее выявленных трещин в структуре материала до термической обработки. Данная термическая обработка сняла остаточные напряжения в материале до уровня, когда не происходит трещинообразование при изготовлении образцов.

Установлено, что после проведения термической обработки в структуре материала увеличиваются размеры зерен. Чем выше мощность лазерного излучения при изготовлении образца и крупнее зерно, тем больше прорастают зерна после термической обработки (рисунок 4.33).

Наличие в структуре материала более мелкозернистой структуры дает более однородные свойства материала в различных направлениях, чем структура материала с крупными зернами (рисунки 4.40 и 4.41).

Полученные свойства образцов, изготовленных по режиму №5 (Р_{ли}= 1000 Вт, h= 1,4 мм и v= 20 мм/с), являются наиболее оптимальными, так как получаемые образцы имеют однородные свойства в различных направления, соответствующие установленным требованиям.

5 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ОПЫТНОЙ ЗАГОТОВКИ ДЕТАЛИ «КОРПУС» С ПОМОЩЬЮ АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО НАНЕСЕНИЯ МЕТАЛЛОВ

Для обеспечения изготовления ДСЕ «Корпус» требуется оптимизировать исходную 3D модель детали и наложить припуска, необходимые для дальнейшей механической обработки заготовки, после чего разработать управляющую программу для гибридного комплекса ГК-01.

Для возможности использования кроссплатформенности CAD моделей исходная 3D модель имеет формат STEP. STEP (Standard for Exchange of Product model data – стандарт обмена моделью данных изделия) – совокупность стандартов ISO 10303 используемая в САПР, которая позволяет описать весь жизненный цикл изделия, включая технологию изготовления и контроль качества продукции. Для окончательной подготовки 3D модели использовалось программное обеспечение Autodesk PowerShape.

Следующей стадией подготовки является создание управляющей программы. Создание управляющей программы производилось в программном обеспечении PowerMill, имеющем постпроцессор для гибридного комплекса ГК-01.

На заключительном этапе представлен разработанный маршрутный технологический процесс изготовления заготовки детали «Корпус» по аддитивной технологии прямого лазерного нанесения.

5.1 Оптимизация конструкции заготовки детали «Корпус» для аддитивной технологии прямого лазерного нанесения

Исходная деталь имеет конструкцию, которую затруднительно изготовить, а в некоторых случаях и вовсе невозможно. Также необходимо учесть, что в аддитивном процессе прямого лазерного нанесения металлов, как и в процессе сварки образуются направленные напряжения в результате усадки расплавленного металла при переходе из жидкой в твердую фазу. Ввиду этого изготавливаемая деталь начинает активно деформироваться вслед за напряжениями. В связи с этим, конструкция детали требует оптимизацию непосредственно под технологию прямого лазерного нанесения.

Оптимизация конструкции детали под особенности процесса прямого лазерного нанесения и используемого оборудования.

Изготовление профильной стенки шпангоутов под углом 90° (рисунок 5.1) не представляется возможным, так как из-за технологических ограничений оборудования невозможно выполнить наклон позиционера на угол 90°.



Рисунок 5.1 – 3D-модель исходной детали «Корпус»

Опытным путем было получено, что профильная стенка шпангоута, при изготовлении детали по аддитивной технологии прямого лазерного нанесения без наклона позиционера, должна иметь угол к вертикали не более 30°. Если угол превышает 30°, стенка гарантированно начинает падать с места наплавки. Для исправления данной проблемы было принято решение уменьшить угол наклона от вертикали до 30° с перестроением 3D модели, результат показан на рисунке 5.2.



Рисунок 5.2 – Внешний вид скорректированной конструкции шпангоутов детали «Корпус»: *а*) эскиз; *б*) 3D модель

Также для упрощения процесса прямого лазерного нанесения необходимо выпрямить кривую разветвления шпангоутов. Результат представлен на рисунке 5.3.



Рисунок 5.3 - Кривые, полученные при изменении угла начала обода на 30°

101

Из рисунка 5.3 видно, что шпангоуты в нижней части после изменения стали более массивными, это связано с изначально спроектированной вертикальной стенкой шпангоутов, расположенной на одном расстоянии от основной стенки детали «Корпус».

Для уменьшения кривизны линии смыкания были увеличены радиусы скругления на углах шпангоутов. Основная стенка детали «Корпус» остается без изменений. Полученный результат представлен на рисунках 5.4 и 5.5.



Рисунок 5.4 - Изменение радиуса скругления углов шпангоутов на примере проекции исходного и полученного контуров



Рисунок 5.5 - Кривые, полученные при изменении радиусов скругления на углах шпангоутов

Все элементы детали, кроме фланца, изготавливаются с толщиной стенки в 1 валик (3±1 мм). Для подготовки 3D модели к работе в САМ модуле, она была оптимизирована путем замены твердых тел на срединные поверхности.

Изготовление фланца желательно производить с пропорциональным повтором контура с заданным шагом. Для реализации данной стратегии наплавки было принято решение представить фланец и жертвенный слой в виде тонкостенных дисков с шагом по высоте, равному высоте слоя (рисунок 5.6).



Рисунок 5.6 - 3D модель подготовленного нижнего фланца

Наложенные припуска на фланец с жертвенным слоем и подложкой, используемой как основание для прямого лазерного нанесения, представлены ниже на разработанных эскизах (рисунки 5.7 и 5.8). Также на указанных эскизах тонкой линией показана исходная геометрия детали «Корпус».









Для того чтобы изготовить деталь «Корпус», требуется разработать основание, на которое будет производиться наплавка. Стоит учесть, что деталь крупногабаритная и будут присутствовать значительные деформации при ее изготовлении. С целью минимизации деформаций, в качестве основания был выбран лист толщиной 20мм. Эскиз разработанной подложки для изготовления - представлен на рисунке 5.9.



Рисунок 5.9 – Эскиз подложки

Увеличение жесткости конструкции.

Процесс прямого лазерного нанесения, как упоминалось ранее, создает напряжения в материале изготавливаемой детали. По этой причине основную стенку детали «Корпус» необходимо усилить по короткой и длинной сторонам для уменьшения деформаций. На углах корпуса установка стрингеров не требуется, так как на углах больше жесткость конструкции.

С этой целью внутри детали были смоделированы стрингеры (ребра жесткости), их изготовление происходит одновременно с изготовлением основного контура заготовки. 3D модель стрингеров и окончательная 3D модель всей заготовки показаны на рисунках 5.10 и 5.11 соответственно.



Рисунок 5.10 - 3D модель стрингеров



Рисунок 5.11 - 3D модель окончательной заготовки ДСЕ «Корпус»

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 прямого лазерного нанесения за счет установленных ребер жесткости.

5.2 Разработка управляющей программы для изготовления опытной заготовки детали «Корпус»

Процесс просчета траектории обработки имеет значительный уровень ресурсоемкости. Также программное обеспечение PowerMill периодически может экстренно закрываться при работе со сложными проектами. Для облегчения работы было принято решение разделить корпус на 4 части:

- жертвенный слой и нижний фланец;

- участок, ограниченный нижним расширением;

- участок, ограниченный средним расширением;

- участок, ограниченный верхним расширением.

Программы для ЧПУ станка создавались для каждого участка отдельно.

Создание траекторий перемещений.

В программном обеспечении PowerMill существует огромное количество различных стратегий обработки. Для работы с тонкостенными поверхностями рационально применять следующие стратегии:

- чистовая обработка поверхности;

- обработка с постоянной Z;

- аддитивный модуль Netfabb.

При изготовлении данной детали использовалась стратегия: «Чистовая обработка поверхности». Основные окна задания настроек представлены на рисунках 5.12 – 5.15.

Чистовая обработка поверхности	? ×
🛞 👔 Имя траектории	Main_1
Локальная СК Заготовка Инструмент Станок Учёт материала Учёт материала Чистовая обработка поверхности Учёт материала Чистовая обработка поверхности Балон Автоматическая проверка Автоматическая проверка Автоматическая проверка Ось инструмента Ось инструмента Укоренные ходы Подводы и переходы Начальная точка Сограни и скорости Дистория Подачи и скорости Подами и описание Параметры пользователя	Дисковая Ммя LASER Геометрия Сеометрия Сеометрия Салина 0,1 0,05 0,1 Нижний R. кромки 0,05 Статус инструмента Корректный
	No.инструмента Количество кромок 1 Вычислять профиль патрона Вычислить В очередь ОК Закрыть

Рисунок 5.12 - Задание параметров инструмента

Чистовая обработка поверхности	? X
Имя траектории	Main_1
	Чистовая обработка поверхности
— Ниструмент — Станок	Сторона Снаружи
	Шаг обработки Расстояние
 Чистовая обработка поверхности F Высокоскоростная (HSM) Даблон Автоматическая проверка Размещение точек Ось инструмента Управление осями станка Уукоренные ходы Подводы и переходы Начальная точка Конечная точка Подачи и скорости Порачи и скорости Примечания и описание 	Безопасное отклонение 0,3 Допуск 0,1 Припуск 0,1 Шаг (Расстояние)
Параметры пользователя	Просмотр Показать
	Вычислить В очередь ОК Закрыть

Рисунок 5.13 - Главные настройки стратегии «Чистовая обработка поверхности»
Чистовая обработка поверхности	? ×
Имя траектории	Main_1
Локальная СК Заготовка Инструмент Станок	Шаблон
 Ограничить Учёт материала Чистовая обработка поверхности 	Направление шаблона V 🗸
); Высокоскоростная (HSM) 	Порядок В одну сторону 👻 Стартовый угол Мах. U Min. V 🗸
••• Размещение точек ••• Размещение точек ••• Ось инструмента ••• Управление осями станка	Очерёдность Нет
	U V Начало 0,0 0,0
 Подачи и скорости История Примечания и описание 	Конец 1,0 1,0
🔤 🛃 Параметры пользователя	Просмотр Показать
	Вычислить В очередь ОК Закрыть

Рисунок 5.14 - Параметры направления обработки

🦻 Чистовая обработка поверхности	? ×
Имя траектории	Main_1
 Докальная СК Заготовка Инструмент Станок Ограничить Учёт материала Чистовая обработка поверхности Белокоскоростная (HSM) Шаблон 	Ось инструмента Ось инструмента Вертикально
Автоматическая проверка Размещение точек Съ инструмента Управление осями станка Управление осями станка Лодводы и переходы Подводы и переходы Начальная точка	Фиксированный угол Элевация 89,9 Конфигурация поворотной оси
 Конечная точка Одачи и скорости История Примечания и описание Параметры пользователя 	Траектория Автоматическое предотвращение столкновений Сохр. участки со столкновениями Ограничения оси инструмента Сглаживание оси инструмента
	Показать ось инструмента Вычислить В очередь ОК Закрыть

Рисунок 5.15 - Параметры позиционирования детали в станке при обработке

Скоростные режимы подачи представлены на рисунке 5.16.

109



Рисунок 5.16 - Параметры скорости

Полученные траектории проверялись с помощью симуляции, при удовлетворительном результате продолжалась работа с оставшимися поверхностями. Примеры полученных траекторий представлены на рисунках 5.17 и 5.18.



Рисунок 5.17 - Траектория движения лазерной головы по основной поверхности детали

110



Рисунок 5.18 - Траектория движения лазерной головы в части стрингера

Для минимизации напряжений в начале и конце замкнутого круга следует увеличить расстояние между стартовыми точками, пример данной операции представлен на рисунке 5.19.



Рисунок 5.19 - Изменение расположения точек старта в замкнутых контурах

Изготовление основной поверхности детали производилось с одновременными многоосевыми движениями станка (вращение стола вокруг оси С и линейные перемещения по осям XYZ). Изготовление стрингеров производилось трёхосевыми линейными движениями станка по осям XYZ.

Каждую отдельную траекторию необходимо перевести в статус аддитивной, на рисунке 5.20 показан пример одного слоя, полученного при конвертации траектории.



Рисунок 5.20 - Один из слоев, полученных после конвертации траектории в аддитивную

В процессе наплавки необходимо придерживаться послойной структуры процесса. Для этого, с помощью отдельного плагина, все траектории были объединены в одну. При нарушении порядка слоёв происходит переконвертация траекторий с ошибкой и повторным объединением траекторий с помощью плагина. Пример полученной траектории представлен на рисунке 5.21.

Как видно из рисунка 5.21 данная траектория не оптимизирована в частности вспомогательных переходов. Для оптимизации используется перебор порядка поверхностей при объединении, разбиение траектории на несколько меньших или ручное исправление.



Рисунок 5.21 - Общая траектория печати после операции объединения

Пример оптимизированной траектории представлен на рисунке 5.22.



Рисунок 5.22 - Оптимизированная траектория печати

Оптимизация технологических переходов значительно сокращает время изготовления заготовки, затрат МПК и защитного газа. Создание управляющей программы.

Управляющая программа для гибридного комплекса ГК-01 пишется с использованием языка программирования G-кода. Данный код получен с помощью постпроцессора. Окно настроек постпроцессора представлено на рисунке 5.23. Однако периодически он имеет программные опечатки, которые в процессе работы могут повлиять на окончательный вид детали.

▲ NC-файл	: OBECHAIKA_I	MID_3_PP6					3	
2	Им	ия OBECH	IAIKA_MID_3_P	P6				8
	Файл вывода C:\Users\Noname\Desktop\NVM\Obechayka\POW			OWER_MI	LL\OB	2		
	Стано	ж	~	Поло	жение моделі	и		~
	Постпроцессо	Hybrid	_v6					2
	СК вывод	ца 🛛	~		Имя деталі	OBEC	HAIKA	
Ном	мер программ	ы 1		Вые	водимая точк	а Кроми	ca	~
Pac	познавать мно	огоосевую	Вкл 🗸	Про	омежуточные	Однов	ремен	н ~
Траектория	н Номер	Диаметр	Конец	Длина	Вылет	Допуск	При	пус
Result 4	1	0,1	0,05	0,1		0,1	0	
« Сме	на инструмен	га При но	вом ин ~	Нум	ерация инстр	. Как за	дан	>
< Сме	на инструмен	га При но	вом ин 🗸	Нум Точка смень	ерация инстр	н. Как за, а После	дан	>
 Сме Траектория Инструмен No.инст 	на инструмен Сброс нт грумента 1	га При но	вом ин ∨ Общая длина	Нум Точка смень а 0,1	ерация инстр и инструмент ID). Как за а После LASER	дан • пром	> 0
<	на инструмен Сброс нт грумента 1 а инструмента Длин	га При но	Вом ин ∨ Общая длина 0	Нум Точка смень а 0,1 Рад	ерация инстр и инструмент ID ииус Нет	н. <mark>Как за</mark> а а После LASER	дан • пром	> v
< Сме Траєктория Инструмен Коррекция	на инструмен Сброс нт грумента 1 а инструмента Длин Вывод цикло	га Прино 13 Вык/ V	рвом ин ∨ Общая длина 0	Нум Точка смень а 0,1 Рад	ерация инстр и инструмент ID циус <u>Нет</u> Эхлаждение [Как за, После LASER Стандарт 	дан е пром 0	× • •

Рисунок 5.23 - Окно настроек постпроцессора

Подобные ошибки исправляются вручную, либо средствами автозамены или с помощью прописанных макросов для текстовых редакторов. Далее полученный G-код дополнительно проверяется непосредственно на станке с ЧПУ.

5.3 Разработка маршрутного технологического процесса изготовления заготовки детали «Корпус»

Подготовка под прямое лазерное нанесение включает в себя зачистку подложки абразивным кругом до металлического блеска. После зачистки производится установка подложки с помощью вкрученных в нее рым болтов, строп и кран-балки на стол позиционера гибридного комплекса. Перед запуском процесса, для обеспечения должного сплавления изготавливаемой заготовки детали с материалом подложки, производится ее обезжиривание ацетоном по всей поверхности наплавки.

Установив подложку, производиться визуальная проверка банок с используемой МПК. Так как исходная МПК поставляется в банках с аргоном, проверяется их целостность и соответствие сопроводительной документации. После вскрытия банки проверяется визуальным контролем отсутствие посторонних включений. Далее производиться загрузка МПК в порошковый питатель.

Перед запуском управляющей программы необходимо убедиться в правильности управляющей программы, для чего производиться холостой прогон. При соответствии управляющей программы, запускается первый слой программы без подачи МПК, прогревается подложка. Далее выполняется пуск программы и производиться изготовление заготовки детали.

После изготовления, производится сбор МПК с помощью промышленного пылесоса и демонтаж изготовленной заготовки детали.

Заключительным этапом производиться контроль геометрии при помощи 3D сканера.

На основании проведенных ранее исследований, разработан маршрутнотехнологический процесс аддитивной технологии прямого лазерного нанесения для изготовления заготовки детали «Корпус» (таблица 5.1).

115

№ операции	Наименование операции	Переходы	Оборудование, инструмент,
			оснастка
005	Входной контроль	1. Контроль целостности банок с МПК, контроль отсутствия	Контрольный стол
		посторонних включений, контроль наличия сопроводитель-	
		ной документации.	
010	Подготовительная	1. Произвести зачистку подложки до металлического блеска;	Пневмоинструмент,
		2. Произвести установку подложки на стол позиционера ги-	Шлифовальные круги,
		бридного комплекса ГК-01;	Рым болты,
		3. Произвести обезжиривание подложки белой хлопчатобу-	Стропы,
		мажной салфеткой, смоченной ацетоном. Наличие серых пя-	Кран-балка,
		тен на салфетке не допускается;	Белая х/б салфетка,
		4. Произвести загрузку МПК из жаропрочного сплава ЭП648	Ацетон,
		в порошковый питатель гибридного комплекса ГК-01;	Гибридный комплекс ГК-01.
		5. Произвести проверку управляющей программы;	
		6. Произвести прогрев подложки холостым проходом перво-	
		го слоя управляющей программы без подачи МПК по следу-	
		ющему режиму: мощность лазерного излучения P= 1000Bт;	
		диаметр пятна	

№ операции	Наименование операции	Переходы	Оборудование, инструмент, оснастка
		лазера 2,7 мм, расход коаксиального газа Ar = 20 л/мин, ско-	
		рость движения лазерной головы v= 20 мм/сек.	
015	Наплавка (прямое лазер-	1. Произвести наплавку (прямое лазерное нанесение) заго-	Гибридный комплекс ГК-01,
	ное нанесение)	товки детали «Корпус» по следующему режиму: мощность	Промышленный пылесос,
		лазерного излучения P= 1000Вт; диаметр пятна лазера 2,7 мм,	Рым болты,
		расход коаксиального газа Ar = 20 л/мин, скорость наплавки	Стропы,
		υ= 20 мм/сек, расход МПК из жаропрочного сплава	Кран-балка.
		ХН50ВМТЮБ 35гр/мин; расход транспортирующего газа 10	
		л/мин.	
		2. Произвести сбор МПК в рабочей камере;	
		3. Произвести демонтаж изготовленной заготовки детали	
		«Корпус»	
020	Контрольная	Произвести контроль геометрии полученной заготовки детали	ATOS
		«Корпус» на соответствие требованиям нормативной доку-	
		ментации и требованиям чертежа.	

Выводы по главе

В данной главе выполнена оптимизация конструкции исходной детали «Корпус» для возможности ее изготовления по аддитивной технологии прямого лазерного нанесения на гибридном комплексе ГК-01. 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 прямого лазерного нанесения за счет установленных ребер жесткости.

По разработанной 3D модели заготовки, разработана 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.

6 АПРОБАЦИЯ РАЗРАБОТАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ОПЫТНОЙ ЗАГОТОВКИ ДЕТАЛИ «КОРПУС» С ПОМОЩЬЮ АДДИ-ТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО НАНЕСЕНИЯ МЕ-ТАЛЛОВ

6.1 Процесс изготовления опытной заготовки детали «Корпус»

Начиналось изготовление заготовки с наплавки жертвенного слоя. Жертвенный слой наплавляется до выравнивания горизонтальной плоскости, когда прекращаются деформации подложки и служит компенсатором деформаций. С целью снижения затрат, жертвенный слой наплавлялся с использованием вторичной МПК на производительном режиме №1.3 ($P_{ЛИ}$ = 1400 Вт, h= 1,6 мм и υ= 40 мм/с). Использование вторичной МПК обусловлено тем, что полученный из нее жертвенный слой в последующем удаляется и к нему не требуется соблюдение прочностных свойств, предъявляемых к детали. Также использование вторичной МПК позволяет создать «безотходное» производство и повысить КИМ практически до 100% при прямом лазерном нанесении.

Стадия прямого лазерного нанесения жертвенного слоя с фланцем представлена на рисунке 6.1.



Рисунок 6.1 – Процесс изготовления фланца: *а*) фланец со стрингерами, *б*) внешний вид наплавленных валиков со стрингером

На рисунке 6.1 *б*) показан внешний вид наплавленных валиков. При промежуточном контроле дефектов не обнаружено. Наплавленный материал имеет металлический блеск, что свидетельствует об отсутствии перегрева и достаточной защите процесса от окисления.

На следующем этапе производилось прямое лазерное нанесение тонкой стенки, до шпангоута. Тонкая стенка изготавливалась толщиной в 1 валик. Процесс изготовления представлен на рисунке 6.2.



Рисунок 6.2 – Процесс изготовления тонкой стенки

При изготовлении, слои формировались также стабильно. Дефектов при промежуточном контроле не обнаружено. Отклонение стенки от 3D модели не происходило, что свидетельствует о достаточной жесткости конструкции.

После прямого лазерного нанесения тонкой стенки, выполнен переход на расширение шпангоута (рисунок 6.3).



Рисунок 6.3 – Процесс изготовления расширения шпангоута

Изготовление сужения шпангоута реализовано с наклоном позиционера (рисунок 6.4).



Рисунок 6.4 – Процесс изготовления сужения шпангоута

Перед смыканием контуров, был выполнен технологический останов на короткое время, во время которого заготовка была наклонена на угол более 90° для удаления МПК из полости. После удаления МПК, процесс был продолжен.

Полученная заготовка после сужения первого шпангоута представлена на рисунке 6.5.



Рисунок 6.5 – Полученная заготовка после сужения первого шпангоута

Далее циклы по изготовлению последующих шпангоутов повторялись (рисунки 6.6 и 6.7).



Рисунок 6.6 – Процесс изготовления второго шпангоута



Рисунок 6.7 – Процесс изготовления третьего шпангоута

После выполнения всех этапов изготовления был произведен сбор незахваченной МПК в рабочей камере гибридного комплекса ГК-01 при помощи промышленного пылесоса. После чего произведен демонтаж заготовки детали «Корпус».

Заготовка детали «Корпус», полученная по аддитивной технологии прямого лазерного нанесения представлена на рисунке 6.8.

Заготовка при визуальном контроле не имеет дефектов, все слои нанесены равномерно. Дефектов геометрии на данном этапе не выявлено.

После прямого лазерного нанесения заготовка подвергнута термической обработке для снятия напряжений по отработанному ранее режиму. Исправление дефектов после прямого лазерного нанесения не потребовалось.





б



Рисунок 6.8 – Изготовленная заготовка детали «Корпус» по аддитивной технологии прямого лазерного нанесения: *а*) вид спереди; *б*) вид сбоку; *в*) вид сверху

6.2 Контроль геометрии опытной заготовки детали «Корпус» при помощи 3D сканирования

Для оценки деформаций заготовки детали «Корпус» после прямого лазерного нанесения и термической обработки были выполнены замеры геометрии на ATOS.

Сканер ATOS – это оптическая координатно-измерительная система, состоящая из сенсора с двумя камерами, проектора, компьютера, штатива и поворотного стола. Его функция заключается в построении 3D модели любой заданной фигуры. Для этого он делает серию снимков поверхностей объекта с разных сторон, а затем соединяет их в одно целое. Подобные устройства оптимальны для автомобилестроения, машиностроения и приборостроения.

Контроль геометрии полученной заготовки после прямого лазерного нанесения позволяет выявить отклонения, полученные в результате образовавшихся напряжений в процессе наплавки. При последующем прямом лазерном нанесении заготовок, с каждой последующей итерацией, исходная 3D модель заготовок изменяется с учетом выявленных деформаций. В результате чего получаемые заготовки приобретают геометрию, соответствующую исходной 3D модели.

Важно отметить, что в случаях если заготовка проходит термическую обработку, требуется дополнительный контроль геометрии после ее выполнения, а также после отделения подложки и удаления жертвенного слоя.

В связи с вышеуказанным, на заготовке детали «Корпус», непосредственно после прямого лазерного нанесения, был выполнен контроль геометрии на ATOS, результаты которого представлены на рисунках 6.9 - 6.12.

Выполненный контроль геометрии заготовки после термической обработки и отделения подложки с жертвенным слоем представлены на рисунках 6.13 – 6.16.



Рисунок 6.9 – Результаты замеров заготовки детали «Корпус»

на ATOS до термической обработки, вид спереди



Рисунок 6.10 – Результаты замеров заготовки детали «Корпус»

на ATOS до термической обработки, вид сзади

128



Рисунок 6.11 – Результаты замеров заготовки детали «Корпус»

на ATOS до термической обработки, вид слева



Рисунок 6.12 – Результаты замеров заготовки детали «Корпус»

на ATOS до термической обработки, вид справа



Рисунок 6.13 – Результаты замеров заготовки детали «Корпус»

на ATOS после термической обработки, вид спереди



Рисунок 6.14 – Результаты замеров заготовки детали «Корпус»

на ATOS после термической обработки, вид сзади



Рисунок 6.15 – Результаты замеров заготовки детали «Корпус»

на ATOS после термической обработки, вид слева



Рисунок 6.16 – Результаты замеров заготовки детали «Корпус»

на АТОЅ после термической обработки, вид справа

Установлено, что полученные деформации заготовки до термической обработки составляют: по короткой стороне до 2,5 мм, по длинной до 5,2 мм. После термической обработки «закалка» деформации составляют: по короткой стороне до 2,5 мм, по длинной до 4,7 мм. Установленные ребра жесткости удержали стенки заготовки детали «Корпус».

Полученная геометрия заготовки удовлетворяет предъявляемым требованиям для опытной детали.

Выводы по главе

На основании выполненной отработки технологии изготовления заготовки детали «Корпус» технологией прямого лазерного нанесения было установлено:

1. Подтверждено, что подобранные режимы являются стабильными. При наплавке сопло не отдаляется от рабочей точки и находится в рабочей зоне.

2. Наплавленный материал из жаропрочного сплава XH50BMTЮБ серебристого металлического цвета, что свидетельствует о достаточной защите и об отсутствии перегрева металла.

3. При прямом лазерном нанесении отсутствуют деформации и процесс наплавки происходит в соответствии с 3D моделью исходной заготовки, что свидетельствует о достаточности «стрингеров», используемых в качестве ребер жесткости.

4. По разработанному технологическому процессу прямого лазерного нанесения из жаропрочного стареющего никель-хромового сплава ХН50ВМТЮБ, представленному в работе, <u>изготовлен опытный образец</u> заготовки детали «Корпус» выходного устройства перспективного изделия, <u>соответствующий</u> предъявляемым требованиям к продукции.

5. Полноценное внедрение технологического процесса прямого лазерного нанесения в серийное производство возможно после проведения типовых испытаний сборочной единицы в составе газотурбинного двигателя в соответствии с

ОСТ 1 00450-82 «Двигатели авиационные, вспомогательные силовые установки, выносные коробки привода агрегатов, редукторы и трансмиссии».

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В данной работе было проведено исследование структуры и свойств жаропрочного сплава XH50BMTЮБ, 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 XH50BMTЮБ производства АО «Композит» соответствующая всем предъявляемым требованиям и превосходящая по качеству МПК из жаропрочного сплава XH50BMTЮБ 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 мощности лазерного излучения №8). Также выявлено что с увеличением мощности лазерного излучения уменьшается количество дефектов в виде пор и несплавлений. Аналогично происходит и с уменьшением расстояния между центрами наплавляемых

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. Подобранная термическая обработка позволила снять внутренние напряжения и избавиться от трещинообразования;

4. На основании установленных зависимостей определен оптимальный режим прямого лазерного нанесения ($P_{\Pi H}$ = 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, δ =31,8-36,1 %, ψ =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.

137

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Иноземцев, А.А. Автоматика и регулирование авиационных двигателей и энергетических установок. Системы [Текст] : учеб. для студ. спец. «Авиационные двигатели и энергетические установки»; серия: «Газотурбинные двигатели» // А.А. Иноземцев, М.А. Нихамкин, В.Л. Сандрацский. - М.: Машиностроение. - 2007. - 194 с.
- Ломберг, Б.С. Высокожаропрочные деформируемые никелевые сплавы для перспективных газотурбинных двигателей и газотурбинных установок [Текст] / Б.С. Ломберг, С.В. Овсепян, М.М. Бакрадзе // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумена. - 2011. - С. 4-5.
- Ломбер, Б.С. Жаропрочные и деформируемые сплавы для современных и перспективных ГТД [Текст] / Б.С. Ломбер, С.А. Моисеев // Все материалы.
 Энциклопедический справочник. - 2007. – N 6. - С. 4.
- 4. Сорокин, Л.И. Свариваемость жаропрочных сплавов, применяемых в авиационных газотурбинных двигателях [Текст] / Л.И. Сорокин // Сварочное производство. - 1971. - N 4. - C. 4-5.
- Паршуков, Л.И. Электронно-лучевая сварка и локальная термообработка сварных швов из жаропрочных сплавов [Текст] / Л.И. Паршуков, Ф.З. Гильмутдинов // Труды ВИАМ. - 2017. – N 5 (53). - С. 23.
- Курочко, Р.С. Сварка и пайка жаропрочных материалов горячего тракта ГТД [Текст] / Р.С. Курочко // Авиационная промышленность. - 1982. – N 8. - С. 4-8.
- 7.
 ГОСТ 29273-92 Международный стандарт. Свариваемость. Определение.

 [Электронный ресурс]
 // standartgost.ru
 - URL:

 <u>https://standartgost.ru/g/ГОСТ 29273-92</u> (дата обращения 22.07.2022).
- Демин, Ф.И Технология изготовления основных деталей газотурбинных двигателей [Текст] / Ф.И. Демин, Н.Д. Проничев, И.Л. Шитарев; под. общ. ред. проф. Ф.И. Демина. – 2-е изд. – Самара: Изд-во СГАУ. - 2012. –320 с.

- Эленко, М. А. Аддитивные технологии в машиностроении [Текст] / М. А.
 Эленко, А. А. Попович, И. М. Мутылина. С.-Пб.: Издательство С.-Пб. политехнического университета. - 2013. - 222 с.
- Шишковский, И. В. Основы аддитивных технологий высокого разрешения [Текст] / И.В. Шишковский. - СПб.: Изд-во Питер. - 2015. — 348 с.
- Гибсон, Я. Технологии аддитивного производства [Текст] / Я. Гибсон, Д.
 Розен, Б. Стакер; Пер. с англ. Под ред. И. В. Шишковского. М.: Техносфера/ - 2016. - 656 с.
- ГОСТ Р 57558-2017/ISO/ASTM 52900:2015 Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 1. Термины и определения. [Электронный pecypc] // standartgost.ru - URL: <u>https://standartgost.ru/g/ГОСТ Р 57558-2017</u> (дата обращения 22.07.2022).
- Frazier, W. E. Metal Additive Manufacturing [Текст] / W. Frazier, A Review, J. Mater // Eng. Performance, 23 [6]. - 2014. - P. 1917–1928.
- 14. Граф, Б. Комбинированные лазерные аддитивные технологии производства лопаток турбин сложной геометрической формы [Текст] / Б. Граф, С.Э. Гоок, А.В. Гуменюк и др. // Известия высших учебных заведений. № 3(20). 2016. С. 34-42.
- Lewis, G.K. Directed light fabrication. In: Proceedings of the ICALEO'94 [Текст] / G.K. Lewis, R.B. Nemec, J.O. Milewski [et al] // Laser Institute of America, Orlando. - 1994. - P. 17.
- Агаповичев, А.В. Исследование влияния режимов селективного лазерного сплавления на качество заготовок: метод. указ. [Текст] / А.В. Агаповичев, А.В. Сотов, В.Г. Смелов. Самара: Изд-во Самарского университета, 2017. 32 с.
- 17. Lekurwale, S. Selective laser sintering (SLS) of 3D printlets using a 3D printer comprised of IR/red-diode laser Author links open overlay panel [Текст] /

S. Lekurwale, T. Karanwad, S. Banerjee // Annals of 3D Printed Medicine. – Vol. 6. – 2022. - 100054

- Schmidt, M. Laser based additive manufacturing in industry and academia [Текст] / M. Schmidt, M. Merklein, D. Bourell [et al] // CIRP Annals 2017. -66(2). – P. 561–583.
- Zhao, X. Contouring strategies to improve the tensile properties and quality of EBM printed Inconel 625 parts [Teкct] / X. Zhao, S. Dadbakhsh, A. Rashid // Journal of Manufacturing Processes. – Vol. 62. - 2021. - P. 418-429.
- Chen, B. Influence of heat treatment on microstructure evolution and mechanical properties of TiB2/Al 2024 composites fabricated by directed energy deposition [Teκct] / B. Chen, X. Xi, T. Gu [et al] // Journal of Materials Research and Technology. Vol. 9. 2020. P. 14223-14236.
- Zhang, X. A novel method to prevent cracking in directed energy deposition of Inconel 738 by in-situ doping Inconel 718 [Текст] / X. Zhang, Z. Chai, H. Chena [et al] // Materials and Design. – Vol. 197. – 2021. - 109214.
- Туричин, Г. А Прямое лазерное выращивание перспективная аддитивная технология для авиадвигателестроения [Текст] / Г. А. Туричин, Е. В. Земляков, О. Г. Климова и др. // Сварка и Диагностика. - № 3. - 2015. - С. 54– 57.
- 23. Сомонов, В.В Прямое лазерное выращивание изделий из порошковых материалов: принцип, оборудование и материалы [Текст] / В.В. Сомонов, Г.А. Туричин, Е.В. Земляков и др. // Технические науки в России и за рубежом: материалы VI Междунар. науч. конф. Москва. 2016. 88 с.
- 24. Бабкин, К.Д. Высокоскоростное прямое лазерное выращивание: технология, оборудование и материалы [Текст] / К. Д. Бабкин Е. В. Земляков В. В. Сомонов // Сборник трудов научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Обработка материалов: современные проблемы и пути решения». – Юрга. -2015. - С. 56–61.

- 25. Компания Optomec. Интернет-сайт компании Optomec [Электронный ресурс] URL: www.optomec.com (дата обращения 1.02.2022).
- 26. Компания Fraunhofer. Интернет-сайт компании Fraunhofer [Электронный pecypc] URL: <u>www.ilt.fraunhofer.de</u> (дата обращения 1.02.2022).
- Beyer, E. New Industrial Systems & Concepts for Highest Laser Cladding Efficiency. Fraunhofer-Institut f
 ür Werkstoff- und Strahltechnik. MAY 6, 2011 in LASER CLADDING, LASER MANUFACTURING [Электронный ресурс] URL: <u>http://www.lia.org/blog/2011/05/high-performancelaser-cladding/</u> (дата обращения 1.02.2022).
- Осокин, Е. Н. Процессы порошковой металлургии. Версия 1.0 [Электронный ресурс] / Е. Н. Осокин, О. А. Артемьева // Курс лекций. Красноярск: ИПК СФУ. - 2008. – 403 с. URL: <u>https://dl.booksee.org/genesis/857000/</u> <u>e9378bd421760ac1a764159ea436a7fa/_as/[Osokin_E.N., i_dr.] Processue</u> _poroshkovoi_metallu(BookSee.org).pdf (дата обращения 22.07.2022).
- 29. Tsantrizos, P. G. Method of production of metal and ceramic powders by plasma atomization [Текст] / P. G. Tsantrizos, F. Allaire, M. Entezarian // Pat. US № 5707419. -1998.
- Компания Raymor. Интернет-сайт компании Raymor [Электронный ресурс] URL: <u>www.raymor.com</u> (дата обращения 1.02.2022).
- Boulos, M. Plasma power can make better powders [Текст] / M. Boulos // Metal Powder Report. – Vol. 59. – 2004. – Р. 16-21.
- Donachie, M.J. Superalloys [Текст] / M.J. Donachie, S. Donachie // A Technical Guide, 2 nd Ed. ASM International. 2002. 438 p.
- Fngelo, H. C. Powder Metalurge [Текст] / H. C. Fngelo, R. Subramanian // Science, technology and application. – New Dehli. - 2009. – 128 p.
- Ahsan, M.N. A comparatine study of laser direct metal deposition characteristics using gas and plasma-atomized Ti-6Al-4V powders [Tekct] / M.N. Ahsan,

A. Pinkerton, R.G. Moat [et al] // Materials Science and Engineering. – 2011. – P. 7648-7657.

- 35. Ahsan, M.N. A comparison of laser additive manufacturing using gas and plasma-atomized Ti-6Al-4V powders [Текст] / M.N. Ahsan, A. Pinkerton, L. Ali // Innovative Developments in Virtual and Physical Prototyping. – London: Taylor & Francis Group. - 2012. – P. 625-633.
- Гиршов, В.Л. Современные технологии в порошковой металлургии: учеб. пособие/ В.Л. Гиршов, С.А. Котов, В.Н. Цеменко.- СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та. - 2010. - 385 с.
- 37. YuHan, Z. Morphology and particle analysis of the Ni3Al-based spherical powders manufactured by supreme-speed plasma rotating electrode process [Текст] / Z. YuHan, P. XiangZhang, L. MingLei // Journal of Materials Research and Technology. – Vol. 9. - 2020. – P. 13937-13944.
- ГОСТ 25849-83. Порошки металлические. Метод определения формы частиц. [Электронный ресурс] // standartgost.ru - URL: <u>https://standartgost.ru/g/ГОСТ 25849-83</u> (дата обращения 22.07.2022).
- 39. Kaplanskii, Yu.Yu. The structure and properties of pre-alloyed NiAl-Cr(Co,Hf) spherical powders produced by plasma rotating electrode processing for additive manufacturing [Текст] / Yu.Yu.Kaplanskii, A.A.Zaitsev, Zh.A.Sentyurina // Journal of Materials Research and Technology. –Vol. 7. Issue 4. 2018. P. 461-468.
- 40. Zhong, C. A comparative study of Inconel 718 formed by High Deposition Rate Laser Metal Deposition with GA powder and PREP powder [Текст] / C. Zhong, J. Chen, S. Linnenbrink // Materials & Design. Vol. 107. -№5. 2016. Р. 386-392.
- ГОСТ 18318-73. Порошки металлические. Метод ситового анализа. [Электронный ресурс] // standartgost.ru URL: <u>https://standartgost.ru/g/ ГОСТ</u> <u>18318-73</u> (дата обращения 22.07.2022).

- 42. ГОСТ 6613-86. Сетки проволочные тканные с квадратными ячейками. Технические условия. [Электронный ресурс] // standartgost.ru - URL: https://standartgost.ru/g/ ГОСТ 6613-86 (дата обращения 22.07.2022).
- 43. ГОСТ 20899-75. Порошки металлические. Метод определения текучести.
 [Электронный pecypc] // standartgost.ru URL: <u>https://standartgost.ru/g/</u> <u>ГОСТ 20899-75</u> (дата обращения 22.07.2022).
- 44. ГОСТ 19440-74. Порошки металлические. Определение насыпной плотности. [Электронный pecypc] // standartgost.ru - URL: <u>https://standartgost.ru/g/</u> <u>ГОСТ 19440-74</u> (дата обращения 22.07.2022).
- 45. ГОСТ 18317-73. Порошки металлические. Метод определения содержания воды. [Электронный ресурс] // standartgost.ru
 URL: https://standartgost.ru (дата обращения 22.07.2022).
- 46. ГОСТ 19113-84. Канифоль сосновая. Технические условия. [Электронный pecypc] // standartgost.ru URL: <u>https://standartgost.ru/g/ ГОСТ_19113-84</u> (дата обращения 22.07.2022).
- 47. ГОСТ 8-82. Станки металлорежущие. Общие требования к испытаниям на точность. [Электронный pecypc] // standartgost.ru URL: <u>https://standartgost.ru/g/ ГОСТ_8-82</u> (дата обращения 22.07.2022).
- 48. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. [Электронный pecypc] // standartgost.ru - URL: <u>https://standartgost.ru/g/ ГОСТ_1497-84</u> (дата обращения 22.07.2022).
- 49. ГОСТ 9651-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение при повышенных температурах. [Электронный ресурс] // standartgost.ru - URL: <u>https://standartgost.ru/g/ ГОСТ 9651-84</u> (дата обращения 22.07.2022).
- Никитин, В.И. Наследственность в литых сплавах [Текст] / В.И. Никитин,
 К.В. Никитин. Москва : Машиностроение-1. 2005. 474 с.
- 51. Мазалов, И.С. Перспективы применения жаропрочного структурностабильного сплава ВЖ159 для аддитивного производства высокотемпера-

турных деталей ГТД [Текст] / И.С. Мазалов, А.Г. Евгенов, С.М. Прагер // Авиационные материалы и технологии. - №S1 (43). – 2016. – С. 3-7.

- 52. 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 [Teκct] / A.M. Khakimov, S.S. Zhatkin, K.V. Nikitin // Journal of Physics: Conference Series. 2021. –Vol. 2094.
- 53. 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.
- 54. Климов, В.Г. Использование высокотемпературных порошковых никелевых припоев в качестве износостойких наплавок 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.
- 55. 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.
- 56. Хакимов, А.М. Износостойкость высокотемпературных порошковых припоев на Ni-основе после импульсной лазерной наплавки [Teкст] / А.М. Хакимов, С.С. Жаткин // Металлургия машиностроения. №2. – Москва. – 2019. – С.38-41.
- 57. Хакимов, А.М. Исследование структуры и свойств деталей из жаропрочных и нержавеющих 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.

- 58. Хакимов, А.М. Влияние технологии прямого лазерного выращивания на структуру и свойства жаропрочного никелевого сплава системы Ni–Cr–W– Мо [Текст] / А.М. Хакимов, С.С. Жаткин, К.В. Никитин и др. // Известия вузов. Цветная металлургия. 2022. Т. 28. №. 2. - С. 60–70.
- 59. 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.
- 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.
- 61. 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 научнотехнической конференции. – Самара. – 2018. – С.150-152.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Акт о внедрении результатов диссертационной работы

Директор филиала АО «ОДК» «НИИД», доктор технических наук, доцент С.П. Павлинич 2022г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Хакимова Алексея Мунировича на тему: «Структура и свойства жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ при изготовлении крупногабаритных деталей ГТД по аддитивной технологии прямого лазерного нанесения металлов»

Комиссией филиала АО «ОДК» «НИИД» в составе директора филиала С.П. Павлинича, заместителя директора филиала Е.В. Родина и главного специалиста А.И. Евдокимова рассмотрен вопрос об использовании результатов диссертационной работы Хакимова Алексея Мунировича и установлено следующее:

 По разработанному технологическому процессу прямого лазерного нанесения из жаропрочного стареющего никель-хромового сплава ЭП648 (ХН50ВМТЮБ), представленному в работе, <u>изготовлен опытный</u> образец заготовки ДСЕ «Корпус» выходного устройства перспективного изделия, прошедший все виды контроля и <u>соответствующий</u> предъявляемым требованиям к продукции.

 Полноценное внедрение технологического процесса прямого лазерного нанесения в серийное производство возможно после проведения типовых испытаний сборочной единицы в составе газотурбинного двигателя в соответствии с ОСТ 1 00450-82 «Двигатели авиационные, вспомогательные силовые установки, выносные коробки привода агрегатов, редукторы и трансмиссии».

Заместитель директора филиала АО «ОДК» «НИИД»

филиала АО «ОДК» «НИИД»,

доктор технических наук, профессор

Главный специалист

Е.В. Родин

Egeod -

А.И. Евдокимов

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Разработанный технологический процесс

		-	ГОСТ 3.1105-84 Фо
Дубл.			
Взам.			
	Изделие		33
	Филиал АО "ОДК" "НИИД"		
		"Корпус" заготовка	Д
		ао "одк" "ни	ид" (Мавлинич С.П.,
	КОМПЛЕКТ ДО на технологичес	КУМЕНТОВ кий процесс	
СОГЛАСОВАНО:	КОМПЛЕКТ ДО на технологичес прямого лазерного	КУМЕНТОВ кий процесс выращивания	
СОГЛАСОВАНО:	КОМПЛЕКТ ДО на технологичес прямого лазерного (опытн	КУМЕНТОВ кий процесс выращивания ый)	
СОГЛАСОВАНО: Заместитель директора филиала АО "ОДК" "НИИД"	КОМПЛЕКТ ДО на технологичес прямого лазерного (опытн опытн /Родин Е.В./	КУМЕНТОВ кий процесс выращивания ый)	
СОГЛАСОВАНО: Заместитель директора филиала АО "ОДК" "НИИД"	КОМПЛЕКТ ДО на технологичес прямого лазерного (опытн (опытн /Родин Е.В./ Начали филиа	КУМЕНТОВ жий процесс выращивания ый) ник отдела "Лазерная обработк ла АО "ОДК" "НИИД"	ка»