

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»  
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

На правах рукописи

**БАЛЯКИН АНДРЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ**

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ  
КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЗАГОТОВОК ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННЫХ ГТД  
МЕТОДОМ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ**

**2.5.15 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов**

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
**Хаймович Александр Исаакович**  
доктор технических наук, доцент

Самара – 2025

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Перечень сокращений и обозначений .....                                                                                                                                                                  | 5  |
| ВВЕДЕНИЕ .....                                                                                                                                                                                           | 6  |
| ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ТЕХНОЛОГИИ<br>ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗАГОТОВОК ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННЫХ ГТД .....                                                                                                 | 15 |
| 1.1 Использование аддитивных технологических процессов при изготовлении<br>заготовок деталей авиационных двигателей .....                                                                                | 15 |
| 1.2 Изготовление крупногабаритных заготовок деталей камер сгорания ГТД .....                                                                                                                             | 17 |
| 1.3 Обзор методов аддитивного производства .....                                                                                                                                                         | 21 |
| 1.3.1 Технология прямого лазерного выращивания .....                                                                                                                                                     | 23 |
| 1.4 Параметры процесса ПЛВ и их влияние на качество формообразования<br>заготовки .....                                                                                                                  | 25 |
| 1.5 Влияние лазерной расфокусировки на рельеф поверхности в процессе ПЛВ .....                                                                                                                           | 32 |
| 1.6 Фазовый состав жаропрочных никелевых сплавов .....                                                                                                                                                   | 37 |
| 1.6.1 Частицы $\gamma$ -фазы .....                                                                                                                                                                       | 38 |
| 1.6.2 Частицы $\gamma'$ -фазы .....                                                                                                                                                                      | 39 |
| 1.6.3 Частицы $\gamma''$ -фазы .....                                                                                                                                                                     | 40 |
| 1.6.4 Частицы $\delta$ -фазы .....                                                                                                                                                                       | 40 |
| 1.6.5 Фазы Лавеса .....                                                                                                                                                                                  | 41 |
| 1.6.6 Карбидные фазы .....                                                                                                                                                                               | 42 |
| 1.7 Возможные дефекты, возникающие в процессе ПЛВ жаропрочных никелевых<br>сплавов .....                                                                                                                 | 43 |
| Заключение по главе 1 .....                                                                                                                                                                              | 47 |
| ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО<br>ИЗЛУЧЕНИЯ И МЕТАЛЛОПОРОШКОВОЙ КОМПОЗИЦИИ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ<br>ДИАПАЗОНА РАЦИОНАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ<br>ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ ..... | 52 |
| 2.1 Описание процесса ПЛВ и постановка задачи .....                                                                                                                                                      | 52 |
| 2.2 Разработка модели взаимодействия лазерного излучения и металлопорошковой<br>композиции в процессе прямого лазерного выращивания .....                                                                | 58 |

|                                                                                                                                                                                                                |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.2.1 Исследование перемещения металлопорошковой композиции и анализ предпосылок для ее сплавления .....                                                                                                       | 58  |
| 2.2.2 Передача энергии лазерного излучения частице порошка и моделирование процесса ввода тепловой энергии.....                                                                                                | 60  |
| Выводы по главе 2.....                                                                                                                                                                                         | 71  |
| ГЛАВА 3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНОГО РЕЖИМА ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА ЭП648 И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕГО ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ.....                                                           | 74  |
| 3.1 Оборудование и методика, используемые для проведения экспериментов .....                                                                                                                                   | 74  |
| 3.2 Исследование технологических свойств МПК высоколегированного жаропрочного сплава на никелевой основе ЭП648 .....                                                                                           | 75  |
| 3.3 Определение рациональных технологических параметров выращивания жаропрочного сплава ЭП648.....                                                                                                             | 83  |
| 3.4 Статистическая обработка результатов и определение рациональных технологических параметров выращивания жаропрочного сплава ЭП648 .....                                                                     | 98  |
| 3.4.1 Корреляционный анализ для образцов без проведения термообработки .....                                                                                                                                   | 98  |
| 3.4.2 Регрессионный анализ для образцов без проведения термообработки.....                                                                                                                                     | 102 |
| 3.4.3 Корреляционный анализ для образцов после термической обработки .....                                                                                                                                     | 108 |
| 3.4.4 Непараметрический анализ для образцов после термической обработки ...                                                                                                                                    | 109 |
| 3.5 Исследование влияния технологических режимов термической обработки на формирование структуры и механических свойства крупногабаритных заготовок деталей авиационных ГТД из жаропрочного сплава ЭП648 ..... | 116 |
| 3.6 Исследование влияния величины лазерной расфокусировки на рельеф поверхности при прямом лазерном выращивании .....                                                                                          | 125 |
| 3.6.1 Определение рельефа поверхности на верхней части образцов .....                                                                                                                                          | 126 |
| 3.6.2 Определение рельефа поверхности боковых стенок образцов .....                                                                                                                                            | 127 |
| 3.6.3 Рельеф поверхности образцов, полученных в результате исследования влияние величины расфокусировки лазерного луча .....                                                                                   | 130 |
| 3.6.3.1 Рельеф верхней поверхности образцов.....                                                                                                                                                               | 132 |
| 3.6.3.2 Рельеф поверхностей на боковых стенках образцов .....                                                                                                                                                  | 134 |

|                                                                                                                                                                            |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.6.3.3 Влияние величины лазерной расфокусировки на механизм формирования верхней поверхности.....                                                                         | 136 |
| 3.6.3.4 Механизм образования налипших выступов на боковой стенке .....                                                                                                     | 141 |
| Выводы по главе 3 .....                                                                                                                                                    | 145 |
| ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ<br>ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ<br>КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЗАГОТОВОК АВИАЦИОННЫХ ГТД МЕТОДОМ ПЛВ<br>.....                    |     |
| .....                                                                                                                                                                      | 147 |
| 4.1 Этапы проектирования технологического процесса ПЛВ.....                                                                                                                | 147 |
| 4.2 Разработка методики проектирования технологического процесса ПЛВ<br>крупногабаритных заготовок камер сгорания ГТД.....                                                 | 149 |
| 4.3 Рекомендации по проектированию геометрических элементов заготовок,<br>получаемых методом ПЛВ .....                                                                     | 160 |
| Выводы по главе 4.....                                                                                                                                                     | 162 |
| ГЛАВА 5 ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ<br>ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ НА ПАО «ОДК-КУЗНЕЦОВ».....                                                                        |     |
| .....                                                                                                                                                                      | 164 |
| 5.1 Анализ технологичности деталей «Кожух наружный камеры сгорания» и<br>«Кожух внутренний камеры сгорания» ГТД.....                                                       | 164 |
| 5.2 Разработка стратегии изготовления крупногабаритных заготовок камер<br>сгорания ГТД.....                                                                                | 166 |
| 5.3 Техничко-экономическое обоснование выбора технологии ПЛВ для получения<br>крупногабаритных заготовок камер сгорания ГТД.....                                           | 172 |
| 5.4 Технологическая подготовка изготовления заготовок.....                                                                                                                 | 175 |
| 5.5 Изготовление крупногабаритных заготовок деталей ГТД .....                                                                                                              | 179 |
| Выводы по главе 5.....                                                                                                                                                     | 186 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....                                                                                                                                                           | 187 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....                                                                                                                                                     | 189 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А Технологический процесс изготовления крупногабаритных<br>заготовок деталей «кожух наружный камеры сгорания» и «кожух внутренний<br>камеры сгорания» ГТД ..... |     |
| .....                                                                                                                                                                      | 210 |



## Перечень сокращений и обозначений

CAD – Computer Aided Design, система автоматизированного проектирования;

CAE – Computer aided engineering, система автоматизации инженерных расчётов;

WAAM – Wire Arc Additive Manufacturing, проволоочно-дуговое аддитивное производство;

АП – аддитивное производство;

АТ – аддитивные технологии;

ГОСТ – государственный стандарт;

ГТД – газотурбинный двигатель;

ГТУ – газотурбинная установка;

ЕСТПП – единая система технологической подготовки производства;

КД – конструкторская документация;

КИЗ – коэффициент использования заготовки;

КС – камера сгорания;

КПД – коэффициент полезного действия;

МПК – металлопорошковая композиция;

МКЭ – метод конечных элементов;

ПЛВ – прямое лазерное выращивание;

СЛС – селективное лазерное сплавление;

ТД – техническая документация;

ТО – термическая обработка;

ТП – технологический процесс;

ТУ – технические условия;

УП – управляющая программа.

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** С учётом того, что современные газотурбинные двигатели (ГТД) должны соответствовать растущим требованиям по улучшению тягово-экономических характеристик, повышению надёжности и эффективности, уменьшению веса при ограничении по стоимости, возникает необходимость в разработке новых конструкций компонентов и узлов, а также в применении современных высокопроизводительных технологий, обеспечивающих снижение трудоёмкости их изготовления. Одной из таких технологий является прямое лазерное выращивание (ПЛВ), которое обеспечивает высокий коэффициент использования материала и позволяет получать заготовки с минимальным припуском на последующую обработку. Например, в условиях традиционного производства время, затраченное на изготовление кожуха камеры сгорания ГТД, состоящего из четырёх отдельных кольцевых заготовок, составляет 2-3 месяца, а технологический процесс (ТП) содержит порядка 200 операций. Применение технологии ПЛВ при производстве кожухов камер сгорания ГТД за счёт достоинств, указанных ранее, позволит сократить время их изготовления в 2 раза. Разработка ТП изготовления заготовок сложнопрофильных крупногабаритных деталей методом ПЛВ является сложной, комплексной и многовариантной задачей, требующей учёта большого числа разнообразных факторов для последующего выбора рациональных условий их изготовления на основе математического моделирования взаимодействия лазерного излучения и металлпорошковой композиции.

Исходя из вышеизложенного, применение технологии ПЛВ для изготовления крупногабаритных заготовок деталей камер сгорания ГТД, является экономически выгодным направлением совершенствования ТП, что позволит значительно повысить эффективность производства ГТД при наличии соответствующей методики. Поэтому тема диссертации, направленная на разработку методики проектирования ТП изготовления крупногабаритных заготовок деталей камер сгорания ГТД методом ПЛВ, является актуальной. Данное исследование 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.

**Степень разработанности темы.** Вопросами разработки и применения технологических процессов аддитивного производства при изготовлении деталей различных изделий, занимались многие отечественные и зарубежные учёные, такие как Г.А. Туричин, О.Г. Оспенникова, В.Г. Смелов, Ю.А. Ножницкий, Л.А. Магеррамова, Д.Н. Трушников, Д.Ю. Колодяжный, Е.В. Земляков, К.Д. Бабкин, А.В. Сотов, А.М. Вильданов, В.В. Исаков, И.С. Мазалов, О.М. Огородникова, А.В. Рипецкий, В.Г. Низьев, О.П. Решетникова, А.Г. Аксенов, P.M. Bhatt, P. Gradl, T. Schopphoven, Y.J. Yoon, R. Kovacevic, A.T. Anderson, G. Backes, R.K. Malhan, A. Cervone, S.K. Gupta, P. Colonna, A. Rubenchik и другие. К сожалению, в работах данных авторов не уделено должного внимания процессу ПЛВ крупногабаритных заготовок тонкостенных деталей из жаропрочных и жаростойких материалов.

Как известно, на протекание процессов лазерного выращивания, осуществляемых различными аддитивными методами, определяющее влияние оказывают технологические параметры, такие как мощность лазерного излучения, расход МПК и т.д. Поиском рациональных значений данных параметров при различных условиях выращивания занимались А.И. Логачёва, В.Я. Беленький, А.А. Попович, В.Ш. Суфияров, А.Г. Григорьянц, И.А. Ядроитцев, Н.С. Баранова, И.Ю. Смуров, В.Н. Петровский, А.А. Холопов, Р. А. Латыпов, И. А. Логачёв, А.М. Хакимов, А.В. Осинцев, П.С. Джумаев, П.А. Кузнецов, С. ML. Dezaki, A. Serjouei, A. Zolfagharian, Hong, D. Gu, D. Dai, M. Alkhayat, G. Piscopo, L. Iuliano и другие. Однако лишь в некоторых работах указанных авторов рассматриваются вопросы, связанные с определением рациональных технологических параметров при выращивании заготовок из жаропрочных материалов. А это имеет очень важное значение, например, для технологических процессов изготовления заготовок деталей авиационных ГТД.

Определение рациональных технологических параметров процессов лазерного выращивания, как правило, осуществляется на основе математических

моделей. Разработкой моделей взаимодействия лазерного излучения и МПК занимались О.Б. Ковалёв, А.Ф. Ильющенко, А.С. Бореjšо, А.В. Савин, В.И. Богданович, М.Г. Гиорбелидзе, A.J. Pinkerton, I. Tabernero, A. Lamikiz, S. Martínez, D. Eisenbarth, E. Ukar, F. Wirth, S. Freihse, K. Wegener, W. Devesse, D. De Baere, P. Guillaume, Y.L. Huang, G.Y. Liang, J.Y. Su, T. Ozel, V. Shankar, S.A. Khairallah и другие. При этом важно обеспечить эффективную величину значения фокусного расстояния в зависимости от технологических параметров выращивания. К сожалению, такой аналитической модели, позволяющей определить эту величину для различных условий ПЛВ, в литературе не обнаружено.

Следует отметить, что хотя исследованиями в области влияния фокусировки лазерного излучения на рельеф получаемой поверхности занимался целый ряд ученых, в том числе С.П. Мурзин, Н.Л. Казанский, И.В. Шишковский, A. Paraschiv, G. Matache, M. R. Condruz, J. Chen, S. Sui, T. F. Frigioescu, Lv. Chunchi, J. Wang, H. Li, Q. Yin, W. Liu, S. Shen, H. Tan, C. Zhong, Z. Li, X. Ming, S. Zhang и другие, этот вопрос требует более глубокой проработки, а именно в части влияния изменения лазерной фокусировки на стабильность процесса ПЛВ и качество выращенного материала.

**Цель работы:** повышение производительности изготовления крупногабаритных деталей авиационных ГТД с использованием технологического процесса изготовления заготовок методом прямого лазерного выращивания на основе разработки методики, обеспечивающей получение требуемых характеристик заготовки за счёт определения рациональных условий прямого лазерного выращивания.

#### **Задачи исследования:**

1. Разработать аналитическую математическую модель плавления металлопорошковой композиции под воздействием лазерного излучения в процессе прямого лазерного выращивания, посредством программы РТС Mathcad выполнить численное исследование влияния параметров формообразования

заготовки на расстояние до зоны расплавления для определения эффективной величины фокусного расстояния.

2. Исследовать влияние основных технологических параметров выращивания (мощности лазерного излучения, скорости выращивания, расхода металлопорошковой композиции) на формирование геометрии, предел прочности, структуру и трещинообразование наплавляемого жаропрочного сплава ЭП648. С использованием регрессионного анализа определить рациональные технологические параметры выращивания с учётом результатов аналитического моделирования.

3. Исследовать влияние расфокусировки лазерного излучения на рельеф поверхности, отклонение геометрии и стабильность процесса плавнения. Создать базу данных влияния условий прямого лазерного выращивания на геометрические размеры и микроструктуру образцов из сплава ЭП648, необходимую для проектирования технологического процесса изготовления крупногабаритных заготовок деталей авиационных ГТД.

4. Разработать методику проектирования технологического процесса для изготовления крупногабаритных заготовок деталей авиационных ГТД из жаропрочного сплава ЭП648 методом прямого лазерного выращивания.

5. Разработать технологический процесс ПЛВ крупногабаритных заготовок из жаропрочных сплавов на основе использования полученных рациональных технологических режимов сплавления и проверить его работоспособность при изготовлении крупногабаритных заготовок деталей «Кожух наружный камеры сгорания» и «Кожух внутренний камеры сгорания» из жаропрочного сплава ЭП648 для ГТД семейства «НК». Подтвердить заявленные характеристики стендовыми испытаниями.

**Объект исследований.** Технологические процессы производства крупногабаритных заготовок деталей авиационных ГТД из жаропрочных сплавов.

**Предмет исследований.** Крупногабаритные заготовки для деталей камер сгорания ГТД из жаропрочного сплава ЭП648.

**Научная новизна работы:**

1. Разработана аналитическая математическая модель взаимодействия лазерного излучения и металлопорошковой композиции для процесса прямого лазерного выращивания, позволяющая установить зависимости между параметрами формообразования (скоростью газопорошковой струи, насыпной плотностью, средним радиусом частиц металлопорошковой композиции и мощностью лазера), отличающаяся от известных решений учётом полноты плавления металлопорошковой композиции вне зоны ванны расплава.

2. На основе разработанной и экспериментально верифицированной математической модели выполнен численный эксперимент, полученные результаты позволяют уточнить границы рациональной области технологических режимов прямого лазерного выращивания (мощности лазерного излучения, скорости выращивания, расхода металлопорошковой композиции) для последующего поиска рациональных значений методом регрессионного анализа.

3. Методом регрессионного анализа определено рациональное значение мощности лазерного излучения при сплавлении металлопорошковой композиции жаропрочного сплава ЭП648 на основе данных натурного эксперимента по определению механических характеристик (предела прочности, относительного удлинения и твёрдости) в состоянии до и после термообработки. В отличие от известных решений, принятый подход позволил уменьшить область многокритериального поиска до одного фактора – мощности лазерного излучения с учётом результатов теоретического моделирования и базы знаний по рациональным значениям остальных технологических параметров: высоты слоя, шага наплавки, скорости наплавки.

4. Установлены закономерности влияния величины расфокусировки лазера на геометрическую точность и параметры рельефа поверхностей заготовок. В отличие от известных решений, были предложены новые параметры оценки характерных изменений рельефа заготовок: отклонение и нестабильность высоты наплавки для верхней торцевой поверхности и максимальная высота для боковых стенок заготовки.

5. Разработана методика проектирования технологических процессов изготовления крупногабаритных заготовок деталей авиационных ГТД прямым лазерным выращиванием, включающая аналитическую модель взаимодействия лазерного излучения и металлпорошковой композиции, регрессионные зависимости и базу знаний для определения рациональных значений технологических параметров, метод повышения геометрической точности заготовки путем численного моделирования процесса в САЕ-системе.

**Теоретическая значимость работы** заключается в разработке новой математической модели взаимодействия лазерного излучения и МПК для процесса ПЛВ, учитывающей пространственно-энергетические параметры в зоне выращивания; в получении регрессионных зависимостей влияния мощности лазерного излучения на прочностные характеристики наплавляемого материала; в предложении параметров для оценки качества рельефа верхней поверхности и боковых стенок заготовок.

**Практическая значимость результатов работы** заключается в разработке методики проектирования ТП ПЛВ крупногабаритных заготовок деталей авиационных ГТД, включающей алгоритм проектирования, определение рациональных технологических параметров, обеспечивающих снижение трудоёмкости, увеличение производительности и повышение качества изготовления крупногабаритных заготовок деталей авиационных ГТД; установлении влияния технологических режимов термической обработки на анизотропию свойств, микроструктуру и механические свойства сплава ЭП648; в разработке рекомендаций по проектированию элементов конструкций заготовок, изготавливаемых технологией ПЛВ; в разработке и реализации ТП изготовления крупногабаритных заготовок деталей «Кожух наружный камеры сгорания» и «Кожух внутренний камеры сгорания» ГТД по технологии ПЛВ из отечественной МПК – жаропрочного никелевого сплава ЭП648.

**Содержание диссертации соответствует** пункту 9 «Теоретические основы и технологические процессы изготовления деталей двигателей и агрегатов летательных аппаратов, включая технологическую подготовку производства, в том

числе автоматизированные системы проектирования и управления, технологические процессы и специальное оборудование для формообразования и обработки деталей двигателей, их защита» паспорта специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

**Методы исследований.** Достижение поставленной цели и решение задач диссертационной работы осуществлялись с использованием аналитических методов теории теплопроводности, плавления и кристаллизации твёрдых тел, а также методов численного моделирования с использованием программного продукта для математических вычислений PTC MathCAD.

Натурные эксперименты проводились на современном сертифицированном оборудовании с использованием стандартных методик и поверенных средств измерений. Обработка результатов экспериментальных исследований осуществлялась с применением методов математической статистики. Стендовые испытания крупногабаритных деталей «Кожух наружный камеры сгорания» и «Кожух внутренний камеры сгорания» из жаропрочного сплава ЭП648, заготовки для которых изготовлены методом ПЛВ, были проведены на стенде ПАО «ОДК-Кузнецов» (г. Самара) в составе технологического ГТД, обеспечивающего реальные условия эксплуатации.

**На защиту выносятся следующие положения:**

1. Математическая модель взаимодействия лазерного излучения и МПК для процесса ПЛВ, учитывающая пространственно-энергетические параметры процесса и позволяющая определить положение зоны полного расплава МПК, т.е. расстояние от точки начала взаимодействия лазерного луча с МПК до точки её полного расплавления.

2. Установленные зависимости, полученные на основе численного эксперимента влияния скорости газопорошковой струи, насыпной плотности, среднего радиуса частиц металлопорошковой композиции и мощности лазера на положение зоны полного расплава МПК, т.е. расстояние от точки начала взаимодействия лазерного луча с МПК до точки её полного расплавления.



3. Регрессионные зависимости влияния мощности лазерного излучения на прочностные характеристики (предел прочности, относительное удлинение и твердость) жаропрочного сплава на никелевой основе ЭП648 до и после термообработки.

4. Зависимости влияния технологических режимов термической обработки жаропрочного никелевого сплава ЭП648 на анизотропию свойств, микроструктуру и механические свойства.

5. Установленные зависимости влияния величины расфокусировки лазера на параметры рельефа верхней и боковых поверхностей заготовок и геометрическую точность получаемых размеров.

**Достоверность и обоснованность полученных результатов** и выводов обеспечивается корректностью физической и математической постановки задач исследования, применением апробированных аналитических и численных методов расчёта и анализа, обоснованностью принятых допущений и ограничений в математической модели, хорошей сходимостью расчётных и экспериментальных данных, положительным эффектом от использования результатов работы в производстве при изготовлении деталей ГТД.

**Апробация результатов исследования.** Основные результаты работы доложены на: Международной научно-технической конференции по достижениям в области прикладной физики и математики – ААРМ-2023 (Узбекистан, г. Ташкент, апрель 2023 г.); International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Environmental Technologies – EMMFT-2023 (Воронеж, апрель 2023 г.); III International Conference on Advances in Science, Engineering and Digital Education – ASEDU-III 2022 (г. Красноярск, октябрь 2023 г.); Международной научно-технической конференции имени Н.Д. Кузнецова «Перспективы развития двигателестроения» (Самара, июнь 2023 г.); X международном технологическом форуме «Инновации. Технологии. Производство» (Рыбинск, апрель 2024 г.); XI международной научно-технической конференции «Лучевые технологии и применение лазеров» (г. Санкт-Петербург, сентябрь 2024 г.).

**Реализация и внедрение результатов работы.** Результаты диссертационной работы в виде методики и технологического процесса изготовления крупногабаритных заготовок деталей «Кожух наружный камеры сгорания» и «Кожух внутренний камеры сгорания» ГТД, технологические процессы их изготовления внедрены на ПАО «ОДК-Кузнецов», что подтверждается актом внедрения от 04.02.2025 г. и актом внедрения результатов диссертации на АО «Самарские авиадвигатели» от 04.02.2025 г. Материалы диссертационной работы нашли применение в учебном процессе Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королёва (акт внедрения от 05.02.2025 г.).

**Связь с государственными программами и НИР.** Результаты исследований нашли практическое применение при реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства по теме: «Организация высокотехнологичного производства промышленных ГТД с интеллектуальной системой конструкторско-технологической подготовки для повышения функциональных характеристик» по договору между Самарским университетом и ПАО «ОДК-Кузнецов» от 24 апреля 2021 г. № 00826, ИГК 000000S407521QLG0002 в рамках выполнения Соглашения с Минобрнауки РФ от 24 июня 2021 г. №075-11-2021-042.

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликовано 25 научных работ, в том числе 5 статей в изданиях, входящих в Перечень, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, 4 – в изданиях, индексируемых в базе Scopus. Получено свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2024620533 и патенты на изобретение № 2830597 С1, № 2832100 С1 и № 2824784 С2.

## ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗАГОТОВОК ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННЫХ ГТД

### **1.1 Использование аддитивных технологических процессов при изготовлении заготовок деталей авиационных двигателей**

Разработка нового поколения авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) и газотурбинных установок (ГТУ) каждый раз требует создание новых конструкций деталей и узлов, а также создание новых технологий и их применения в производстве и при эксплуатации газотурбинной техники [1]. К авиационным ГТД пятого поколения предъявляются следующие основные требования: увеличение тягово-экономических характеристик, повышение надёжности, уменьшение количества деталей, узлов и агрегатов, входящих в состав ГТД и как следствие снижение его массы на 30%. Даже небольшое увеличение эффективности и межсервисного интервала ГТД приводит к значительной экономии топлива и затрат на техническое обслуживание.

Повышение КПД, а также сокращение выбросов  $\text{CO}_2$  и  $\text{NO}_x$  могут быть достигнуты за счет увеличения степени сжатия и температуры газа на входе в турбину, что обеспечивает более чистое и эффективное сгорание топлива [2-4]. Однако увеличение степени сжатия и температуры на входе в турбину означает, что компоненты двигателя будут подвергаться воздействию более высоких температур, более высоких нагрузок и большему воздействию агрессивных коррозионных и окислительных сред, что приводит к снижению срока службы компонентов, более коротким интервалам обслуживания и увеличению стоимости их эксплуатации [2].

Жаропрочные сплавы на никелевой основе нашли широкое применение при изготовлении деталей энергетического и аэрокосмического машиностроения, эксплуатирующихся в течение длительного времени как при нормальных, так и при повышенных температурах. Жаропрочные сплавы на никелевой основе особенно востребованы в современных ГТД и ГТУ наземного и морского применения, поскольку они являются предпочтительными материалами для производства дисков, лопаток, камер сгорания, корпусов горячей части, деталей турбин и т.д. [5-

8]. Заготовки для изготовления вышеуказанных деталей получают традиционными методами, такими как литье, обработка металлов давлением, а также сваркой и методами порошковой металлургии [9-13]. При этом следует отметить, что перечисленные методы получения заготовок предполагают изготовление дорогостоящей оснастки (литейной, штамповой), производство которой занимает значительное время [5, 14, 15]. Кроме того, при производстве деталей, в частности, из жаропрочных сплавов, масса исходных заготовок может в 15 раз превышать массу готовых деталей, а отходы, как показывает производственный опыт, не всегда могут быть использованы повторно. При этом жаропрочные сплавы, как правило, плохо обрабатываются резанием, а в процессе механической обработки заготовок образуется большое количество стружки, переработка которой требует специальных технологий и, следовательно, дополнительных материальных затрат.

Из-за высокой стоимости производства и ремонта деталей ГТД из жаропрочных сплавов на никелевой основе появляется стимул для поиска и применения более экономичных и производительных технологий [16], более рентабельных и надежных процедур ремонта [17], улучшенных геометрических характеристик деталей и их долговечности [18, 19]. С учетом этого аддитивное производство становится перспективным методом для изготовления заготовок и ремонта деталей из жаропрочных материалов.

Развитие и активное использование в производстве аддитивных технологий (АТ) обеспечило возможность изготовления заготовок деталей из металла посредством, в частности, расплавления материала и получения сплошной твердофазной структуры [20, 21, 22]. Аддитивные технологии позволяют за сравнительно небольшое время изготавливать заготовки со сложной геометрической формой, получение которых традиционными методами либо невозможно, либо очень трудоемко. Изготовление любой детали с использованием аддитивных технологий может быть начато сразу же после того, как она будет смоделирована в CAD-системе. Использование аддитивных технологий позволяет снизить коэффициент использования материала заготовки (КИЗ) и тем самым снизить стоимость производства.

С помощью АТ могут быть изготовлены заготовки, обладающие высокими механическими характеристиками. Однако механические свойства и качество получаемых заготовок зависит от многих функциональных и технологических параметров процесса, правильный выбор которых является основополагающим фактором для обеспечения заданных свойств. Применение исходных порошковых материалов и высоких скоростей кристаллизации при сплавлении слоев позволяет получить исключительно однородную мелкозернистую структуру, которую при традиционных технологиях литья обеспечить невозможно. Таким образом, можно уйти от структурных дефектов материала, связанных с литьем, при использовании сплавов, традиционно считающихся проблемными, а именно: жаропрочных высокохромистых никелевых сплавов и интерметаллидных никелевых сплавов для поликристаллического литья.

При изготовлении заготовок деталей из жаропрочных сплавов на основе никеля посредством АТ их механическая прочность в значительной мере зависит от морфологии зерен и образования наплавочного валика [23, 24]. Мелкозернистая микроструктура в материале, получаемом методами АТ, обычно вызывает более высокую твердость и прочность на растяжение по сравнению с деталями, получаемыми методами литья [25]. Однако дефекты АТ или нежелательные фазы могут ухудшить прочность материала [23].

## **1.2 Изготовление крупногабаритных заготовок деталей камер сгорания ГТД**

Камера сгорания (КС) ГТД предназначена для подвода тепла к рабочему телу путем превращения химической энергии топлива в тепловую. Параметры камеры сгорания имеют значительное влияние на эффективность, надежность и экологичность двигателя. Детали камер сгорания работают в условиях экстремальных параметров эксплуатации, подвергаясь следующим воздействиям [4, 26]:

- высокая температура газов (до 2300 К в ядре горения);

- высокие температуры элементов конструкции КС в процессе работы (корпусов – до 600–650 К, жаровых труб – до 1000–1200 К) при значительной неравномерности температурного поля (неравномерность температурного поля может достигать 75–100° по окружности и 40–70° по радиусу);

- элементы конструкции камеры сгорания омываются химически активными газами при повышенном давлении (до 2,5 – 4 МПа) и значительных скоростях движения газа.

Неравномерное тепловое воздействие на элементы конструкции камер сгорания, а также распределение газового потока на отдельные струи с использованием завихрителей, форсунок и смесителей приводят к их короблению и риску образования прогаров, что еще больше искажает газовый поток, приводя к местным перегревам, вибрации и разрушению самой конструкции [26, 27]. Оценка качества работы камеры сгорания осуществляется на основе параметров эффективности, надежности и соответствия экологическим стандартам [28].

Кольцевая камера сгорания состоит из наружного и внутреннего кожухов, которые объединены фронтальным устройством, включающим от 10 до 132 горелок с форсунками. Внутренний и наружный кожухи КС (рисунок 1.1) обеспечивают направление газового потока. Для снижения температуры горелочного газа в кожухах предусмотрена система радиальных (по потоку) отверстий для подмешивания (к нему) воздуха. Поле температур, скоростей и давлений газов на выходе из кольцевой камеры имеет наибольшую равномерность. Кольцевая камера обладает малыми гидравлическими потерями, проще, чем в индивидуальной камере, решается задача герметичных соединений [26, 27]. Недостатки кольцевых камер:

- трудность доводки для обеспечения устойчивого горения, жесткости и прочности, особенно при больших размерах жаровых труб и больших расходах воздуха при его высоком давлении;

- сложность осмотра и ремонта жаровой трубы в эксплуатации.

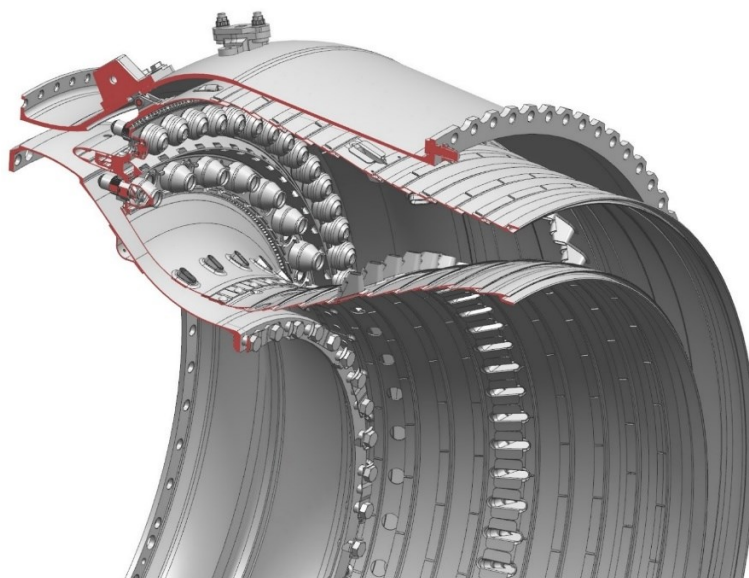


Рисунок 1.1 – 3D-модель кольцевой камеры сгорания

В настоящее время кожухи камеры сгорания изготавливают из бесшовных колец путём их предварительной раскатки с последующей сваркой и механической обработкой. Процесс раскатки колец является длительным, дорогостоящим, трудоёмким и требует предельной точности и соблюдения технологических требований. Работоспособность колец определяется уровнями их кратковременной прочности, ползучести, усталости. Эксплуатационные свойства раскатных колец определяются уровнем механических характеристик, а именно кратковременной прочностью, ползучестью, усталостью. Эти характеристики зависят от структурно фазового состояния материала, которое формируется при раскатке колец. Применяемые технологии производства бесшовных кольцевых заготовок не позволяют получить высокий коэффициент использования материала [29, 30].

В традиционном технологическом процессе используется технологическая схема получения колец раскаткой из кованой заготовки. На ПАО «ОДК Кузнецов» применяется технология изготовления кожухов камеры сгорания из заготовок, полученных точным раскатом. Сам процесс раскатки происходит в несколько переходов с предварительным нагревом [30, 31].

В таблице 1.1 представлен традиционный ТП изготовления кожухов КС ГТД из жаропрочного сплава ЭП648, с использованием в качестве заготовок четырех раскатных колец.

Таблица 1.1 – Технологический процесс изготовления кожухов КС ГТД

|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Параметры                                                                                            | Заготовки, полученные традиционным методом из колец точного раската                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Вес заготовок                                                                                        | Суммарный вес 4-х колец точного раската составляет 221,9/93,9 кг.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Техпроцесс изготовления детали «Кожух наружный камеры сгорания» / «Кожух внутренний камеры сгорания» | Технологический процесс изготовления 1 кольца включает 16 операций, основные из них:<br>Токарная обработка (черновая);<br>Термическая обработка для снятия напряжений;<br>Токарная обработка (предварительная);<br>Вспомогательные и контрольные операции.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|                                                                                                      | Технологический процесс изготовления 2 кольца включает 16 операций, основные из них:<br>Токарная обработка (черновая);<br>Термическая обработка для снятия напряжений;<br>Токарная обработка (предварительная);<br>Вспомогательные и контрольные операции.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|                                                                                                      | Технологический процесс изготовления 3 кольца включает 16 операций, основные из них:<br>Токарная обработка (черновая);<br>Термическая обработка для снятия напряжений;<br>Токарная обработка (предварительная);<br>Вспомогательные и контрольные операции.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|                                                                                                      | Технологический процесс изготовления 4 кольца включает 16 операций, основные из них:<br>Токарная обработка (черновая);<br>Термическая обработка для снятия напряжений;<br>Токарная обработка (предварительная);<br>Вспомогательные и контрольные операции.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|                                                                                                      | Технологический процесс сварки 1 и 2 кольца включает 35 операций, основные из них:<br>Сборка 1 и 2 кольца под сварку;<br>Сварка электроннолучевая 1 и 2 кольца (I часть);<br>Токарная обработка;<br>Термическая обработка для снятия напряжений;<br>Токарная обработка;<br>Рентген контроль;<br>Токарная обработка;<br>Вспомогательные и контрольные операции.                                                                                                                                                                                                                                                   |
|                                                                                                      | Технологический процесс сварки 3 и 4 кольца (II часть) включает 35 операций:<br>Сборка 3 и 4 кольца под сварку;<br>Сварка электроннолучевая 3 и 4 кольца (II часть);<br>Токарная обработка;<br>Термическая обработка для снятия напряжений;<br>Токарная обработка;<br>Рентген контроль;<br>Токарная обработка;<br>Вспомогательные и контрольные операции.                                                                                                                                                                                                                                                        |
|                                                                                                      | Технологический процесс изготовления детали «Кожух наружный камеры сгорания» состоит из сборки и сварки всех частей и включает 62 операций, основные из них:<br>Сборка I и II части под сварку;<br>Сварка электроннолучевая I и II части;<br>Токарная обработка;<br>Рентген контроль;<br>Термическая обработка для снятия напряжений;<br>Рентген контроль;<br>Токарная обработка;<br>Термическая обработка для снятия напряжений;<br>Рентген контроль;<br>Токарная обработка;<br>Пескоструйная обработка;<br>ЭЗО обработка;<br>Слесарная обработка;<br>ЭЗО обработка;<br>Вспомогательные и контрольные операции. |
| Количество операций                                                                                  | Общее количество операций изготовления детали «Кожух наружный камеры сгорания» составляет 196 операций, трудоемкость 859,2 н/ч<br>Общее количество операций изготовления детали «Кожух внутренний камеры сгорания» составляет 196 операций, трудоемкость 586,33н/ч                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |



Подводя итог вышесказанному, можно сделать вывод, что процесс раскатки бесшовных колец является наиболее рациональным по сравнению с АТ, однако для повышения экономичности и эксплуатационной надежности кольцевых деталей ГТД необходимо разработать процесс получения тонкостенных бесшовных кольцевых профилей с однородной структурой и высоким уровнем механических свойств.

Альтернативным способом изготовления крупногабаритных заготовок для деталей «Кожух наружный камеры сгорания» и «Кожух внутренний камеры сгорания» является аддитивный процесс производства крупногабаритных деталей камеры сгорания ГТД из высоколегированного жаропрочного сплава на никелевой основе, изготавливаемых методом прямого лазерного выращивания (ПЛВ).

### **1.3 Обзор методов аддитивного производства**

Аддитивное производство включает группу процессов, позволяющих изготавливать заготовки деталей посредством послойного добавления материала, используя данные, получаемые из CAD-систем. Применяя данное производство, можно создавать заготовки или ремонтировать детали и их элементы, максимально используя материал заготовки, в отличие от традиционных методов механической обработки, при которой материал удаляется из исходной заготовки до тех пор, пока не будет достигнута требуемая форма [32-36].

Согласно ГОСТ Р 57558-2017/ISO/ASTM 52900:2015 [37], процессы аддитивного производства классифицируются по семи типам. Аддитивные технологии обладают рядом достоинств, к которым следует отнести:

- снижение затрат на материалы. При использовании аддитивных технологий в производстве наблюдается резкое снижение брака, поэтому эффективность использования материала значительно увеличивается;
- сокращение времени на производство. Стадия проектирования детали переходит к стадии её изготовления непосредственно из CAD-систем без необходимости дополнительного проектирования и изготовления оснастки для заготовительного производства;

– объединение отдельных деталей в одно целое. Изделия, которые обычно собираются из нескольких деталей, могут изготавливаться в виде единого интегрированного объекта, что устраняет необходимость применения сварки, пайки или использования других сборочных операций. А это сказывается на повышении прочности и снижении массы и стоимости изделия;

– возможность создания деталей со сложной внутренней конфигурацией. Послойное сплавление материала позволяет получать объекты со сложными внутренними элементами, в частности, с перегородками, ребрами жесткости, полостями и т.д., что обеспечивает возможность снижения массы изделия и затрат на производство;

– создание топологически оптимизированных деталей и изделий. Использование при проектировании деталей метода конечных элементов позволяет создавать твердотельные объекты с конфигурациями, обеспечивающими выполнение деталями всех своих функциональных предназначений при минимальной массе. Аддитивное производство предоставляет возможность быстрого и экономного изготовления таких деталей;

– возможность выполнения ремонта неремонтопригодных дорогостоящих деталей и изделий. Твердотельные объекты со сложной конфигурацией, изготавливаемые из высоколегированных сталей и сплавов, которые ранее считались несвариваемыми, могут быть отремонтированы с использованием существующих методов АТ при обеспечении минимальных искажений формы и незначительных микроструктурных дефектов по сравнению с традиционными процессами, такими как дуговая сварка;

– возможность изготовления заготовок с геометрией, полученной в результате реинжиниринга или реверс-инжиниринга. Это процесс быстрого выпуска изделия, благодаря которому можно воссоздать практически любое изделие, если есть эскиз, чертеж или сама деталь.

Таким образом, использование аддитивных технологий при изготовлении деталей позволяет создавать оптимизированные конструкции, значительно повысить коэффициент использования материала, обеспечить снижение

трудоемкости изготовления деталей и высокую эффективность процесса производства в целом.

При формообразовании заготовок деталей, изготавливаемых с использованием АТ, используется минимальное количество материала, необходимое для придания им формы, близкой к форме деталей с минимальными необходимыми припусками под последующую механическую обработку. Это дает инженерам-конструкторам, во-первых, большую свободу при проектировании конструкций изделий, а во-вторых, позволяет обеспечить существенное снижения их массы за счет оптимизации формы. Кроме того, обеспечивается высокая экономическая эффективность производства. Данные преимущества аддитивных технологий особенно привлекательны для производства деталей сборочных единиц и изделий аэрокосмической отрасли, поскольку снижение массы уменьшает расход топлива, что, в свою очередь, ведет к улучшению экономических эксплуатационных характеристик летательных аппаратов [33, 35].

### ***1.3.1 Технология прямого лазерного выращивания***

Наиболее перспективной аддитивной технологией изготовления заготовок крупногабаритных деталей из жаропрочных труднообрабатываемых сталей и сплавов является прямое лазерное выращивание (ПЛВ), когда изделие формируется из металлопорошковой композиции (МПК), подаваемой газопорошковой струей непосредственно в зону сплавления [38-43]. МПК подается в ванну расплава, созданную лазерным излучением, инертным газом посредством специально разработанного сопла для его подачи, совмещенного с лазером для обеспечения захвата порошка. Когда порошок попадает в ванну расплава, он ассимилируется с жидкостью, в результате чего объем расплава увеличивается (рисунок 1.2).

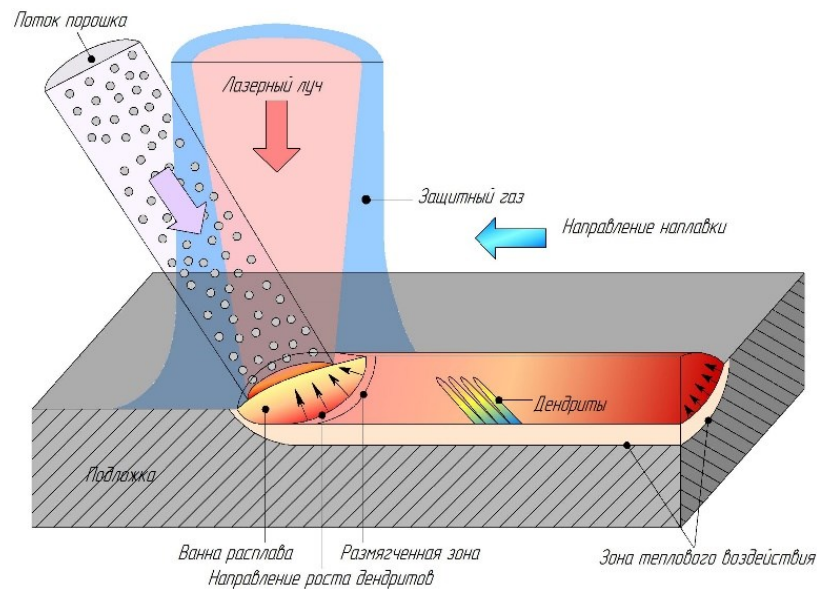


Рисунок 1.2 – Схема процесса прямого лазерного выращивания из МПК

Порошковые материалы, которые используются в аддитивных технологиях, согласно ГОСТ Р 59035 называются металлопорошковыми композициями. МПК – объединенные в общую композицию различные фракции порошка сферической формы одного химического состава [44], термин рекомендуется применять наравне с термином «порошковая композиция для АП» по ГОСТ 57558 [45]. Для выращивания заготовок изделий по технологии ПЛВ используются МПК с размером фракции от 60 до 200 мкм. В отличие от технологии селективного лазерного сплавления, требования к МПК для технологии ПЛВ менее жёсткие: не требуется сферичность или отсутствие сателлитов. Нельзя забывать, что именно качество МПК определяет механические свойства заготовки. Если в МПК есть неметаллические включения – они будут присутствовать и в материале заготовки. Если внутри частиц МПК находятся растворенные газы, то и в заготовке будет присутствовать газовая пористость. Если нарушен химический состав сплава, то это отразится на прочности или приведет к появлению дефектов.

Прямое лазерное выращивание является перспективной заменой традиционных методов получения заготовок для целого ряда деталей, изготавливаемых из дорогостоящих труднообрабатываемых материалов. Вместе с тем следует отметить, что детали, имеющие сложные внутренние элементы и выступы, достаточно проблематично создавать с помощью ПЛВ, так как материал должен поступать в ванну расплава для её поддержания. Если же поступающего

материала для поддержки ванны расплава недостаточно, то процесс наплавления быстро станет нестабильным, что приведет к ухудшению качества изготовления заготовки.

К недостаткам данного метода, во-первых, следует отнести относительно высокую шероховатость поверхности выращенных изделий, а во-вторых, возможность появления дефектов в виде трещин, рыхлот, пор и спаев, т.е. – несплошностей [32]. Шероховатость поверхности и геометрическая точность полученной заготовки требуют выполнения последующей постобработки с применением металлорежущего оборудования.

В отличие от традиционных процессов сварки, в частности, таких, как дуговая сварка неплавящимся электродом в защитной атмосфере инертного газа, ПЛВ позволяет чрезвычайно точно контролировать размер ванны расплава и количество тепла, поступающего в заготовку. Таким образом, рациональные технологические параметры процесса ПЛВ способны обеспечить требуемую микроструктуру наплавленного материала и избежать при этом появления трещин и других дефектов [46].

Используя несколько питателей, через которые осуществляется подача МПК из различных сплавов, можно регулировать состав наплаваемого материала, например, по высоте наплавки. Такая технология подачи МПК в ванну расплава позволяет уменьшить остаточные напряжения между платформой построения и основным материалом, уменьшить гальванический потенциал на границе раздела, который может привести к ускоренной коррозии, а также для придания различных свойств (ударной вязкости, коррозионной стойкости, твердости или износостойкости) отдельным участкам детали.

#### **1.4 Параметры процесса ПЛВ и их влияние на качество формообразования заготовки**

В таблице 1.2 представлены основные параметры и свойства, которыми характеризуется качество выращенных заготовок при использовании в технологическом процессе метода прямого лазерного выращивания.

Таблица 1.2 – Параметры и свойства, характеризующие качество заготовок

| Геометрические свойства   | Механические свойства           | Металлургические свойства                   |
|---------------------------|---------------------------------|---------------------------------------------|
| Размеры наплавки          | Распределение твердости         | Микроструктура                              |
| Отклонения формы          | Остаточные напряжения           | Химический состав                           |
| Шероховатость поверхности | Износостойкость                 | Размер зерна                                |
| Волнистость поверхности   | Предел прочности при растяжении | Однородность химического и фазового состава |
| –                         | Плотность                       | Коррозионная стойкость                      |

На процесс ПЛВ и качество формообразования заготовок оказывают влияние значительное количество параметров (рисунок 1.3). Поэтому постоянный контроль этих параметров является необходимым условием получения предсказуемых и повторяемых результатов при ПЛВ.

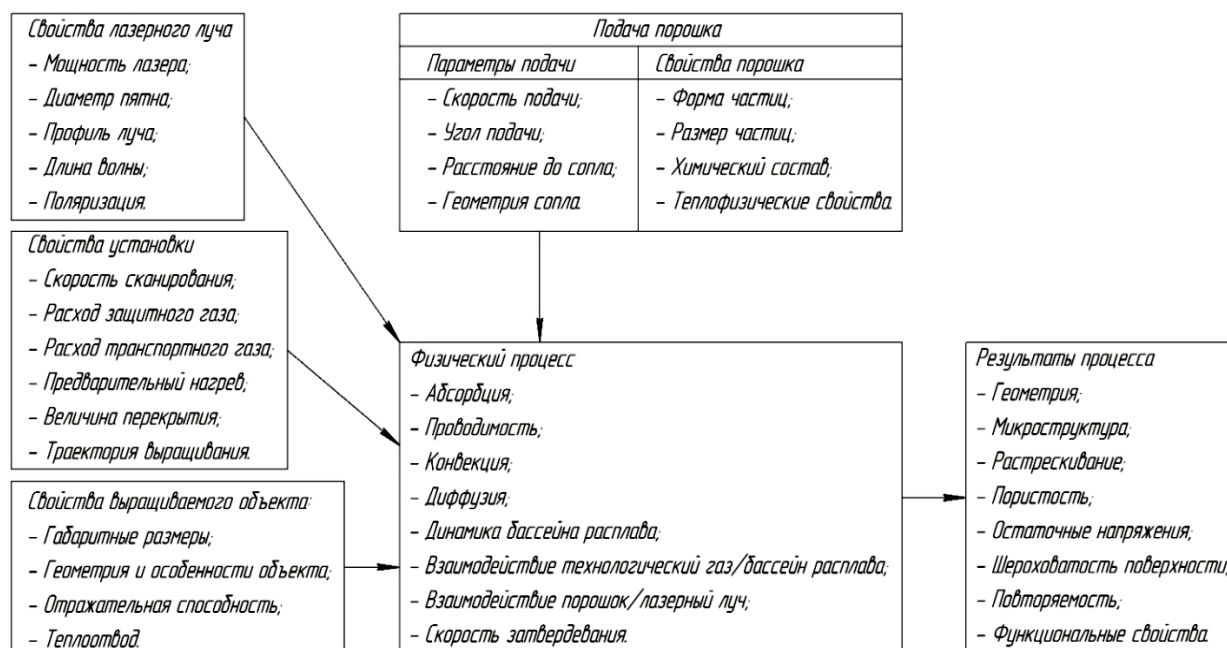


Рисунок 1.3 – Параметры, влияющие на лазерное сплавление металла [46]

**Мощность лазерного излучения.** Лазерное излучение необходимо для нагрева, расплавления МПК и её сплавления с предыдущими слоями. Мощность лазерного излучения существенно влияет на эффективность наплавления и качество поверхности, а также на высоту и ширину наплавленных дорожек.

По мере увеличения мощности лазера увеличивается и ширина дорожек, улучшая качество поверхности выращиваемой заготовки, поскольку для полного расплавления частиц МПК доступно больше энергии [24, 47]. Это приводит к

уменьшению высоты наплавленной дорожки при постоянной скорости движения лазерного луча, скорости подачи порошка и размера лазерного пятна, но вызывает увеличение степени проплавления платформы построения [24].

Если использовать чрезмерную мощность лазерного излучения, она может привести к испарению ванны расплава с последующим увеличением поглощения лазерной мощности и образованием эффекта «замочной скважины» (рисунок 1.4), что хорошо для лазерной сварки толстостенных заготовок, но крайне нежелательно для процесса ПЛВ из-за турбулентности и нестабильности ванны расплава [48].

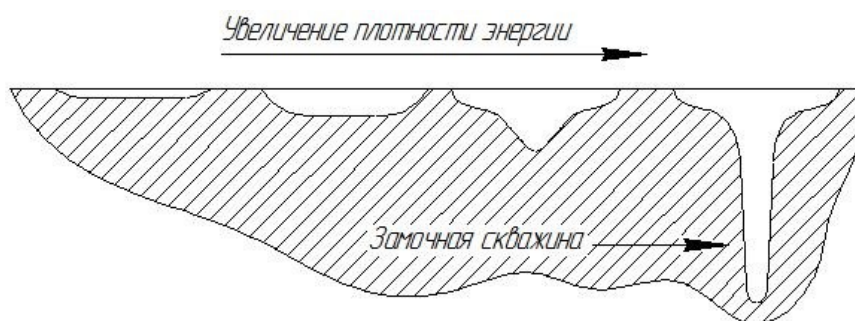


Рисунок 1.4 – Влияние мощности лазерного излучения на форму границы раздела ванны расплава

И наоборот, если мощность лазера недостаточно высока, тогда может быть недостаточно энергии, чтобы вызвать плавление порошинок и сплавление между слоями, что может привести к низкой плотности выращенных слоев и плохой адгезии к платформе построения [24, 48].

**Размер лазерного пятна и профиль луча.** При фиксированной мощности лазера малые размеры пятна создают более высокую плотность энергии, что может привести к испарению легирующих элементов и чрезмерному проникновению в ванну расплава. Уменьшение размера ванны расплава также уменьшает площадь захвата частиц порошка, снижая эффективность процесса и скорость выращивания. Большие размеры лазерного пятна уменьшают плотность энергии при фиксированной мощности лазера и скорости сканирования. Использование большого размера пятна с более высокой мощностью лазера приводит к получению широкой мелкой ванны расплава, которая имеет более обширную площадь захвата частиц порошка, что увеличивает эффективность процесса. Распределение энергии по ширине луча также является важным параметром, который можно настроить с

помощью специальной лазерной оптики, которая может придавать лучу различные профили и распределения энергии. Это может быть очень выгодно при лазерной обработке материалов, так как позволяет контролировать скорость нагрева и охлаждения в зоне взаимодействия, что может улучшить такие параметры, как скорость выращивания и получение мелкозернистой структуры [49].

**Скорость движения лазерного луча.** Высокая скорость перемещения лазерного луча приводит к меньшему времени взаимодействия лазера и МПК и, как следствие, к уменьшению подводимого тепла. Для получения наплавочного валика желаемой геометрии нужно увеличивать мощность лазерного излучения, необходимого для расплавления частиц МПК и её наплавления, а также скорость подачи МПК по массе. Высокая скорость перемещения лазерного луча также изменяет форму ванны расплава с круглой на каплевидную, что может привести к нежелательной зернёной структуре в материале и к образованию трещин на границе зерна [50].

Низкая скорость перемещения лазерного луча может привести к чрезмерному накоплению тепла в материале из-за более длительного взаимодействия лазера с материалом, в то же время как высокая скорость способствует эффектам конвекции ванны расплава, таким как токи Марангони, которые снижают стабильность процесса из-за нарушения поверхности ванны расплава.

**Удельная энергия.** Поскольку влияние лазерного луча на материал зависит от мощности лазера, времени взаимодействия и площади взаимодействия, авторами работы [51] было введено понятие, объединяющее мощность лазера, скорость перемещения лазерного луча и размер лазерного пятна в один параметр, называемый удельной объемной плотностью энергии. Уравнение (1.1) для расчета удельной объемной плотности энергии (VED), Дж/мм<sup>3</sup> приведено ниже [51]:

$$VED = \frac{Q}{V \cdot b \cdot h} \text{ [Дж/мм}^3\text{]}, \quad (1.1)$$

где  $Q$  – мощность лазера (Вт);  $V$  – скорость движения лазерного излучения, мм/мин;  $b$  – ширина валика, мм;  $h$  – высота валика, мм.



Это упрощенное выражение энергозатрат, которое используется для связи качества наплавленного слоя с параметрами выращивания. Из уравнения видно, что одна и та же плотность энергии может быть получена с помощью различных комбинаций мощности лазера, скорости движения лазерного луча и размера наплавляемого валика, но форма валика, размер и его качество будут сильно отличаться.

**Массовая скорость подачи МПК.** Поперечное сечение одиночного наплавленного валика можно описать окружностью, разделённой пополам хордой, которая представляет собой ширину ванны расплава (рисунок 1.5).

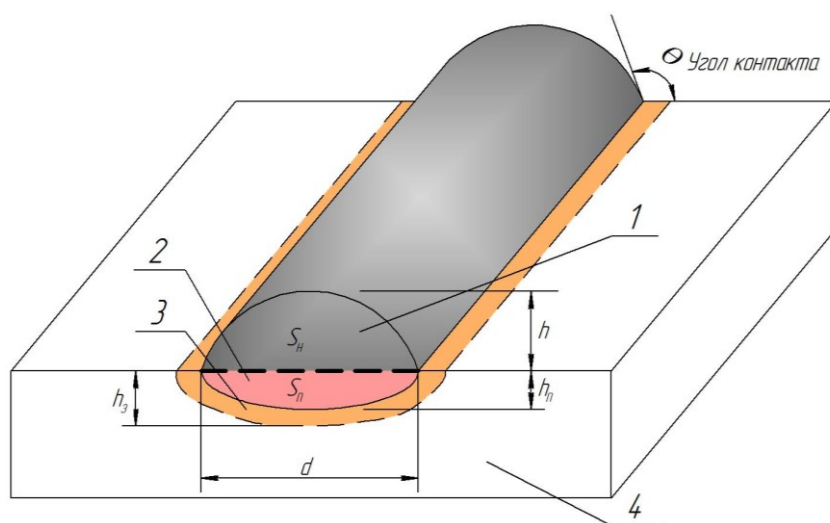


Рисунок 1.5 – Геометрические размеры наплавленного валика:

1 – наплавочный валик; 2 – глубина проплавления; 3 – зона термического влияния; 4 – платформа построения;  $d$  – ширина наплавочного валика, мм;  $h$  – высота наплавочного валика, мм;  $h_n$  – глубина проплавления, мм;  $h_z$  – глубина зоны термического влияния, мм;  $S_n$  – площадь сечения наплавленного слоя;  $S_z$  – площадь сечения проплавления

Высокий массовый расход МПК приведет к тому, что в ванну расплава попадет большое количество МПК, что приводит к увеличению объёма расплавленного материала. Поскольку ширина ванны расплава остается относительно постоянной, увеличение объёма наплавляемого валика приведет к изменению угла контакта ( $\theta$ ) между валиками (рисунок 1.6). Повышение скорости подачи МПК приводит к снижению эффективной энергии лазерного излучения, так как частицы МПК поглощают часть лазерного излучения. И наоборот, низкие скорости подачи МПК позволяют большей части лазерного излучения взаимодействовать с платформой построения или уже наплавленными слоями, увеличивая глубину проплавления.

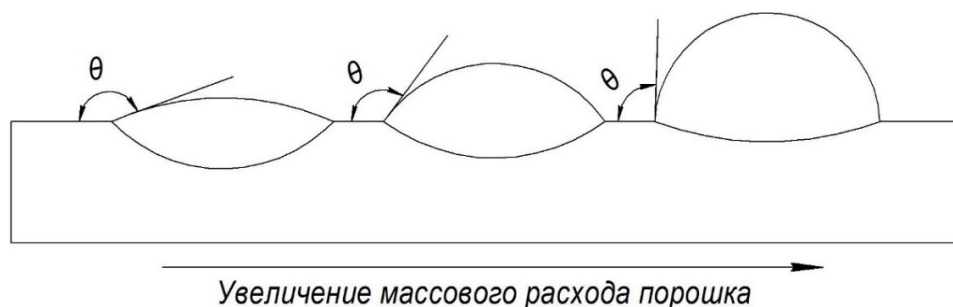


Рисунок 1.6 – Влияние скорости подачи порошка на геометрию наплавки [46, 52]

Влияние различных технологических параметров, используемых в ПЛВ на свойства выращиваемой заготовки сведено в таблице 1.3, которая иллюстрирует влияние увеличения технологических параметров на форму и свойства наплавляемых слоев [24, 46].

Таблица 1.3 – Влияние увеличения различных параметров процесса ПЛВ на свойства наплавленных слоев

| Переменные процесса              | Свойства    |              |           |              |
|----------------------------------|-------------|--------------|-----------|--------------|
|                                  | Высота слоя | Проплавление | Твердость | Толщина слоя |
| ↑ Мощность лазера                | ↓           | ↑            | ↓         | ↑            |
| ↑ Скорость наплавления           | ↑           | ↓            | ↑         | ↓            |
| ↑ Скорость подачи порошка        | ↑           | ↓            | ↑         | ↑            |
| ↑ Диаметр лазерного пятна        | ↑           | ↓            | ↑         | ↓            |
| (↑ = увеличение, ↓ = уменьшение) |             |              |           |              |

**Деформации и остаточные напряжения.** Процесс ПЛВ считается «низкотемпературным» процессом по сравнению с таким процессом, как электродуговая сварка или технология WAAM. Быстрое расплавление платформы построения или нижележащих слоев лазером приводит к очень высоким температурным градиентам, которые в сочетании с различными комбинациями наплавляемого материала и материала платформы построения вызывают термические напряжения. Поскольку предел текучести материала уменьшается с повышением температуры, может происходить пластическая деформация, приводящая к деформации выращенной заготовки. После удаления источника тепла остаточные напряжения остаются в материале и могут способствовать образованию трещин [53, 54].

Выражение для определения термического напряжения ( $\sigma_{\text{термо}}$ ) приведено ниже:

$$\sigma_{\text{термо}} = \frac{E \times \Delta\alpha \times \Delta T}{1 - \nu}, \quad (1.2)$$

где  $\sigma_{\text{термо}}$  – термическое напряжение;  $E$  – модуль упругости наплавленного материала;  $\nu$  – коэффициент Пуассона наплавленного материала;  $\Delta\alpha$  – разница в коэффициенте линейного теплового расширения наплавляемого материала и материала платформы построения;  $\Delta T$  – разница температур между наплавленным материалом и материалом платформы построения.

Из этого выражения видно, что при высоком градиенте температуры тепловое напряжение будет увеличиваться. Точно так же, если материалы платформы построения и МПК имеют большую разницу в значениях коэффициента линейного теплового расширения, тепловое напряжение также будет увеличиваться.

Авторами ряда работ были проведены многочисленные исследования с использованием метода конечных элементов (МКЭ) для моделирования и прогнозирования напряжений и деформаций, которые могут возникать в процессе ПЛВ из металла [53, 55-62]. Исследования распределения напряжения в простых формах, например, проведенные авторами работ [33, 35, 55], показали, что наплавленный материал испытывает остаточное растягивающее напряжение после выращивания, в то время как платформа построения испытывает остаточное напряжение сжатия. Что в процессе ПЛВ приводит к расфокусировке лазерного излучения и МПК. Это, в свою очередь, негативно сказывается на процессе ПЛВ, ухудшает качество поверхности и точность изготавливаемых заготовок. При слишком большом расстоянии расфокусировки лазера энергия лазерного излучения становится рассеянной и недостаточной для расплавления платформы построения и частиц МПК. Поэтому многослойное выращивание не получается из-за уменьшения высоты наплавления. На критическую величину расфокусировки лазера, при которой происходит срыв наплавления, влияют мощность лазера, особенности распространения лазерного луча, скорость наплавления, приращение по оси  $Z$  (рисунок 1.7), теплофизические свойства материала и т.д.

### 1.5 Влияние лазерной расфокусировки на рельеф поверхности в процессе ПЛВ

Процесс ПЛВ представляет собой сложный физический процесс, включающий в себя взаимодействие лазерного луча с МПК и образование ванны расплава, явления переноса в ванне расплава и послойное наплавление. В результате процесса ПЛВ сформированный рельеф поверхностей заготовки имеет ярко выраженные особенности в виде колебаний высоты наплавления на верхней части и налипших металлических брызг на боковых стенках. Схема процесса ПЛВ и выращенной части заготовки показана на рисунке 1.7. Поверхность заготовки – это наплавленный слой, состоящий из нескольких перекрывающихся внутрислойных дорожек. Она перпендикулярна направлению выращивания и формируется в результате движения лазера и движения, обеспечивающего смещение наплавочных валиков.

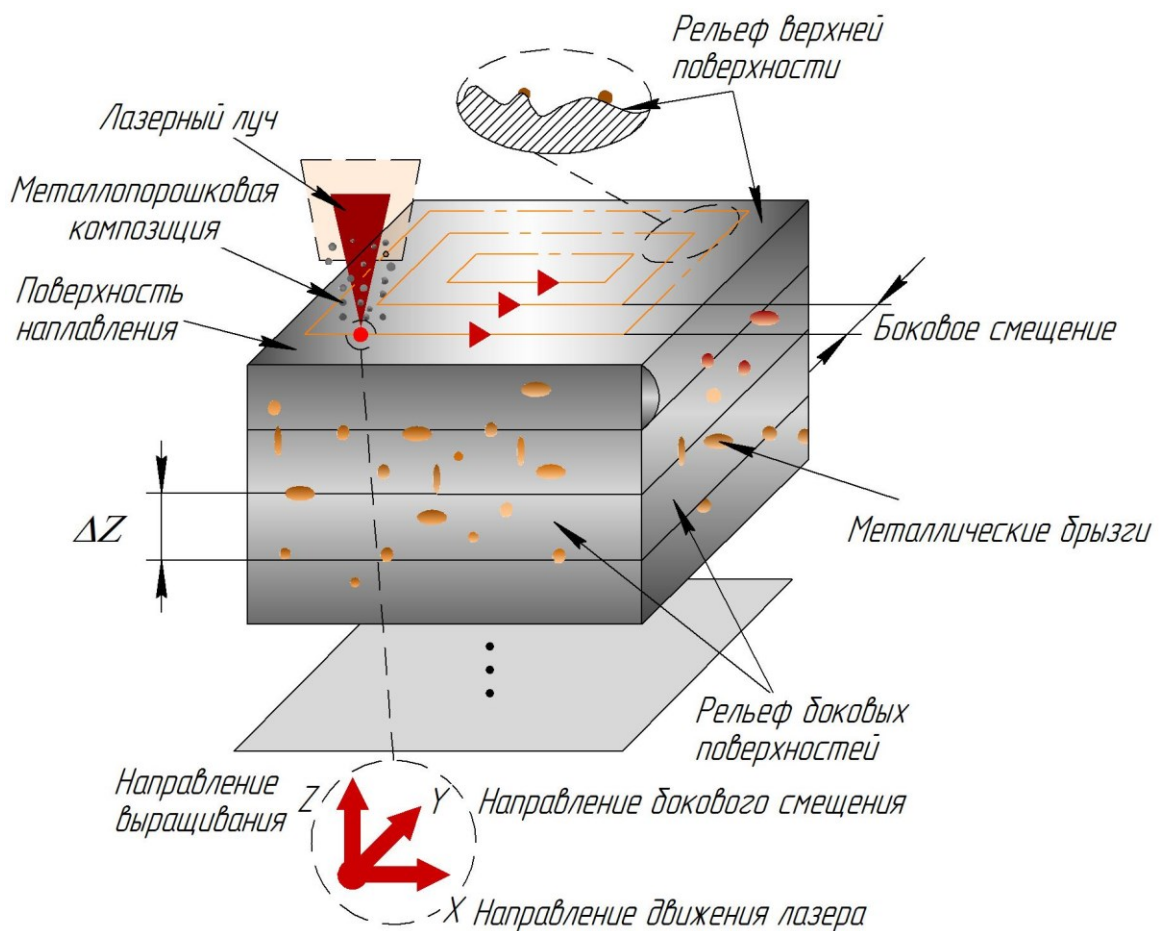


Рисунок 1.7 – Схема получения рельефа поверхности заготовки в процессе ПЛВ

При многоосевом процессе ПЛВ направление выращивания всегда перпендикулярно поверхности построения для устранения эффекта «лестницы». Таким образом, выращенная заготовка содержит только два типа контурных поверхностей: верхнюю и боковые. Верхняя поверхность – это один из внешних контуров и верхний слой выращенной заготовки. Боковые поверхности – это другие контурные поверхности, параллельные направлению выращивания и образованные наложенными друг на друга контурными дорожками соседних слоев.

Поэтому верхняя поверхность и боковины имеют различный рельеф, обусловленный механизмами формообразования. Авторы работы [63] отмечают, что поверхность выращенного слоя может иметь отклонение по высоте как в большую, так и в меньшую сторону, а это приводит к колебаниям высоты выращивания. При этом колебания высоты выращивания текущего слоя, в свою очередь, могут изменить расстояние расфокусировки лазера и МПК при наплавлении последующего слоя, что приводит к несовпадению фактической высоты слоя с приращением по оси Z. Таким образом, суммарные колебания высоты наплавки при наплавлении нескольких слоев могут повлиять на стабильность высоты наплавки в направлении выращивания и даже привести к сбою процесса ПЛВ. Колебания высоты верхней поверхности заготовки показывают конечные суммарные колебания высоты наплавки после многослойного выращивания. Следует отметить, что при застывании полурасплавленных частиц в ванне расплава к наплавленной дорожке прилипают брызги металла. Прилипшие брызги металла на поверхности заготовки могут быть перекрыты соседней дорожкой и последующим наплавленным слоем, так что сохраняется только верхняя поверхность. В работе [64] было высказано предположение, что прилипшие брызги металла на верхней поверхности имеют меньший вред по сравнению с колебаниями высоты наплавления, так как их размер сопоставим с диаметром частиц МПК. Однако брызги металла сохраняются на боковых стенках и увеличиваются при последующем наплавлении по внешнему контуру.

Несмотря на наличие значительного количества работ, посвященных изучению влияния технологических параметров процесса ПЛВ на высоту наплавки, реализованного на основе экспериментальных исследований и моделирования, до сих пор отсутствует глубокое понимание механизма лазерной расфокусировки на высоту наплавления материала. В работе [65] независимо друг от друга исследовано влияние величины лазерной расфокусировки и величины расфокусировки МПК на неровность верхней поверхности, однако не изучено взаимовлияние этих параметров. В работе [66] экспериментально исследовано влияние мощности лазера, скорости перемещения лазерного луча и скорости подачи МПК на геометрические параметры одиночных валиков, такие как высота, ширина и угол контакта. В работе [67] создана аналитическая модель многослойного выращивание толщиной в один валик на основе реального пространственного распределения потока МПК с целью выявления влияния эффективного фокусного расстояния и одноступенчатого подъема на стабильность высоты выращивания. В работе [68] авторами подробно проанализировано явление самостабилизации, имеющее место при определенном расстоянии фокусировки. Установлено, что поверхность заготовки, расположенная немного выше фокусного расстояния потока порошка, может повысить надежность наплавки. Вместе с тем они не учитывали влияние величины расфокусировки лазера на высоту выращивания. В работе [69] исследовано влияние одинаковой величины расфокусировки лазера и газопорошкового потока на высоту наплавления для условия, когда плоскость фокусировки лазера совпадала с плоскостью фокусировки газопорошковой струи. При этом область сопряжения лазерного луча и газопорошкового потока остается постоянной. В работе [70] представлены результаты исследования влияния параметров процесса на характеристики ванны расплава, выполненные с помощью коаксиально расположенной видеокамеры. Авторами данной работы установлена корреляция между площадью ванны расплава и колебаниями высоты наплавки. В работе [63] приведена созданная авторами высокоточная численная модель для однородного и многослойного выращивания. На основе использования ранее упомянутой модели было установлено, что нестабильная скорость подачи и накопление тепла приводят к образованию

неровностей при наплавке. Вместе с тем данная модель не учитывает наложение нескольких валиков МПК в процессе выращивания. Результаты исследования влияния расстояния подъема по оси  $Z$  и расстояния расфокусировки лазера на геометрические характеристики валика приведены в работе [71]. Однако они справедливы для выращивания в одном направлении.

Все ранее упомянутые исследования направлены на улучшение процесса ПЛВ за счет разработки соответствующих рекомендаций, стабилизирующих процесс наплавления материала. Однако для более полного понимания процесса ПЛВ и гарантированного обеспечения его стабильности необходимо проведение комплексного исследования, направленного на выяснение механизма совместного влияния расфокусировки лазерного излучения и МПК на высоту выращивания при многодорожечном и многослойном формообразовании заготовок.

Наличие брызг металла на поверхности является одним из основных факторов, ухудшающих качество поверхности заготовок. Поэтому многие исследования были направлены на определение рациональных параметров процесса ПЛВ с целью повышения качества заготовок. Так, согласно данным, приведенным в работе [72], улучшение качества поверхности тонкостенных деталей из нержавеющей стали было достигнуто за счет увеличения скорости перемещения лазерного луча при одновременном регулировании его мощности для поддержания максимальной температуры ванны расплава. В работе [73] авторами определено влияние мощности лазера, скорости перемещения лазера и скорости подачи МПК на шероховатость поверхности боковых стенок и установлено, что уменьшение толщины слоя и увеличение объёма ванны расплава могут улучшить качество боковой поверхности. А в работе [74] сделано предположение о том, что импульсный лазерный режим может оказать позитивное влияние на снижение шероховатости поверхности. Установлено [75], что нерасплавленные или частично расплавленные частицы МПК на поверхности заготовки значительно увеличивают шероховатость поверхности, а это чревато появлением грубых дефектов на границах наплавленных валиков. В работе [76] исследовано влияние скорости потока защитного газа на формируемую поверхность, а в работе [77] сделано предположение о возможности значительного

улучшения качества поверхности за счет использования лазерного луча кольцевой формы. Однако лазерная головка с кольцевым каналом значительно сложнее в изготовлении и, следовательно, является более дорогостоящей. Исследованию влияния параметров режима наплавки материала, таких как стратегия выращивания, мощность лазера, скорость перемещения лазерного луча и подача МПК, а также размеров частиц МПК на величину выступов на поверхности посвящена работа [78]. В работе [78] установлено, что мощность лазера, скорость перемещения лазерного луча и скорость подачи МПК могут существенно влиять на ширину и высоту выращенного слоя, а следовательно, на производительность процесса и эффективность захвата МПК. Весьма ценным представляется изучение влияния величины расфокусировки лазера на качество боковой поверхности выращенной заготовки.

Понимание процесса адгезии брызг металла имеет большое значение для улучшения качества боковых стенок заготовок. К сожалению, изучению данного вопроса не уделено должного внимания, поэтому отсутствует четкое понимание механизма адгезии брызг к боковым стенкам. Анализ литературы показал, что в большей степени процесс адгезии брызг металла исследовался при селективном лазерном сплавлении (СЛС) и в меньшей – при ПЛВ. По утверждению авторов работы [79], адгезия брызг металла к боковым стенкам в процессе СЛС формируется за счет сфероидального затвердевания материала после разрыва ванны расплава. Однако процесс ПЛВ отличается от процесса СЛС. В работе [80] для описания адгезии МПК представлена модель взаимодействия частиц МПК и кромки ванны расплава, однако допущения, принятые в данной модели, существенно отличаются от реального процесса. Авторами работы [81] установлено, что адгезия порошка приводит к появлению дефектов шероховатости поверхности. Кроме того, ими проанализированы три возможные причины адгезии частиц МПК: несоосность лазерного луча с фокусирующей линзой, несоосность лазерного луча с головкой, подающей МПК, и перефокусировка лазера. Следует также отметить, что, согласно предположениям авторов работы [82], относительный размер диаметра лазерного пятна и ширина наплавленного валика



являются основными факторами, влияющими на налипание частиц МПК на боковую поверхность заготовки.

Технологические параметры оказывают комплексное влияние на процесс формообразования заготовок. Однако, как следует из анализа литературы, в большинстве работ исследовано влияние мощности лазерного источника тепла на процесс ПЛВ. Вместе с тем изучению механизма влияния лазерного пятна и особенностей расфокусировки лазера на процесс формообразования заготовок должного внимания не уделено. Регулировку величины расфокусировки лазера удобно осуществлять с помощью динамической фокусировки. Изменение диаметра лазерного пятна позволяет регулировать точность формообразования. Большое лазерное пятно с высокой мощностью может повысить эффективность использования МПК и производительность процесса [83]. Регулировка величины расфокусировки лазерного луча позволяет изменять диаметр пятна лазера, распределение энергии в пятне и характеристики расходимости. Это широко используется в лазерной резке, лазерной сварке и селективном лазерном сплавлении [84]. В процессе ПЛВ авторы работы [79] обнаружили, что величина расфокусировки лазера влияет на эффект связи между лазерным лучом, потоком порошка и поверхностью построения и, соответственно, на колебания высоты наплавки верхней поверхности и брызг металла на боковых стенках. Поэтому для совершенствования процесса ПЛВ важно изучить механизм влияния величины расфокусировки лазерного излучения на рельеф верхней поверхности и боковых стенок одновременно.

### **1.6 Фазовый состав жаропрочных никелевых сплавов**

В производстве ГТД широко применяются сплавы на никелевой основе, обладающие высокой жаропрочностью и жаростойкостью. Что делает их незаменимыми для изготовления деталей горячей части газотурбинного двигателя (кожухи и жаровые трубы камер сгорания, корпуса турбин и выходные сопла). Сплавы на основе никеля ввиду их сложного легирования имеют и сложный

фазовый состав при этом каждая фаза влияет на механические свойства. Основными фазами, являются:

- 1)  $\gamma$ -фаза – кубическая гранецентрированная решетка;
- 2)  $\gamma'$ -фаза – интерметаллические выделения;
- 3)  $\gamma''$ -фазы – кубическая кристаллическая решётка;
- 4)  $\delta$ -фаза – орторомбическая форма;
- 5) фаза Лавеса
- 6) карбидные фазы.

Согласно работам [85-87] механические характеристики жаропрочного сплава на никелевой основе, зависят от количества легирующих элементов в нём. Авторы работ [88, 89] установили, что в механизме твёрдорастворного упрочнения никелевого сплава, напряжение определяется размером атомов, легирующих элементов, интегрированных в решётку никеля и характером взаимодействия. В механизме дисперсионного упрочнения напряжения зависят от размеров, формы и особенностей распределения легирующей элементов.

Наличие в жаропрочном сплаве на никелевой основе легирующий элементов кобальта, хрома, молибдена и железа, приводят к изменению кристаллической решётки, тем самым образуя неупорядоченный твёрдый раствор замещения. Данный механизм твёрдорастворного упрочнения описан в источниках [85, 87]. При взаимодействии никеля с такими легирующими элементами, как алюминий, титан или тантал происходит образование когерентных частиц  $\gamma'$ -фазы благодаря этому механизму происходит дисперсионное упрочнение никелевого сплава. При превышении предельной концентрации тугоплавких элементов (Co, Cr, Mo, W, Nb) образуются некогерентные частицы карбидов и фазы Лавеса различной формы и конфигурации.

### ***1.6.1 Частицы $\gamma$ -фазы***

$\gamma$ -фаза является основной упрочняющей фазой в жаропрочном никелевом сплаве, состоит из никеля и легирующих элементов. Химически чистый никель имеет кубическую гранецентрированную решётку, упрочнение происходит за счёт замещения в ней никеля легирующими элементами (Co, Cr, Fe, Mo, W, Ta и Re).

Разница в размерах атомов никеля и легирующих элементов, приводит к деформации кристаллической решётки, создавая деформации сжатия и/или растяжения. Искажения кристаллической решетки (деформации) препятствуют движению дислокаций, что приводит к упрочнению никелевого сплава [90].

Жаропрочные никелевые сплавы, в которых упрочнение происходит за счёт механизма твёрдорастворного замещения в решётке никеля легирующими элементами, лучше механически обрабатывается и хорошо свариваются.

### ***1.6.2 Частицы $\gamma'$ -фазы***

Ещё большего упрочнения в никелевых сплавах можно достичь за счёт образования интерметаллидной  $\gamma'$ -фазы, по формуле  $(\text{Ni}, \text{Co})_3(\text{Al}, \text{Ti})$ .  $\gamma'$ -фаза выделяется из твёрдого раствора, оставаясь связанной с никелевой основой, и обладает кубической кристаллической решёткой. В работах [91, 92] установлено, что, при повышенных температурах с присутствием в образцах  $\gamma'$ -фазы предел текучести возрастает в пять раз по сравнению с образцами без неё. В работах [93, 94] показано, что легирующие элементы Al и Ti могут быть замещены другими элементами, которые могут входить в химический состав сплава, что приводит к образованию соединений по формуле  $(\text{Ni}, \text{Cr}, \text{Fe})_3(\text{Al}, \text{Ti}, \text{Nb})$ .

В процессе кристаллизации сплава на высокоугловых границах формируются первичные частицы  $\gamma'$ -фазы с размером до 5 мкм. Эти частицы  $\gamma'$ -фазы играют важную роль в предотвращении роста зёрна во время проведения термической обработки и при дальнейшей высокотемпературной эксплуатации деталей. Как сказано в источниках [95, 96] мелкодисперсные частицы  $\gamma'$ -фазы, которые образуются в результате термической обработки, сохраняют свою форму и деформируются совместно с никелевой матрицей, что повышает прочность и пластичности материала. Размер  $\gamma'$ -фазы зависит от скорости охлаждения сплава, частицы увеличиваются с уменьшением скорости охлаждения [97–100]. Авторы работы [95], разделяют мелкодисперсные частицы  $\gamma'$ -фазы на два типа:

вторичные частицы, с размерами от 40 до 300 нм;

третичные частицы, с размером до 20 нм.

В работе [101] сказано, что форма частиц  $\gamma'$ -фазы зависит от её размера: на начальных стадиях они имеют сферичную форму, а при коагуляции, т.е. соединении частиц, они становятся дендритными. В работах [102, 103] отмечено, что состав легирующих элементов никелевого сплава также имеет влияние на размер частиц  $\gamma'$ -фазы, при котором они меняют свою форму. При создании новых жаропрочных сплавов на никелевой основе разработчики стараются максимально увеличить объёмную долю  $\gamma'$ -фазы, которая обеспечивает улучшенные свойства материала, что особенно важно в условиях эксплуатации при высокой температуре.

### ***1.6.3 Частицы $\gamma''$ -фазы***

С использованием легирующего элемента ниобия, в большом количестве, основным механизмом упрочнения становится,  $\gamma''$ -фаза с формулой ( $\text{Ni}_3\text{Nb}$ ), которая выделяется в когерентной матрице. В работах [104, 105] сказано, что частицы  $\gamma''$ -фазы имеют упорядоченную гранецентрированную кубическую кристаллическую решетку. Как сказано в работах авторов [106, 107, 108], реакция формирования  $\gamma''$ -фазы может происходить через переходную реакцию  $\gamma' \rightarrow \gamma''$ , и непосредственно из твёрдого раствора на основе никеля. Авторы работ [109–111] отмечают, что частицы  $\gamma''$ -фазы имеют характерную для неё, овальную форму, при этом параметр несоответствия кристаллической решётки составляет 2,86%, что приводит к увеличению прочности никелевого сплава. В работах [85, 112, 113] указывается, что длительная выдержка при высокой температуре во время проведения термической обработки может вызывать перераспределение легирующих элементов в  $\gamma''$ -фазы и её переход в орторомбическую форму  $\delta$ -фазы со стехиометрией  $\text{Ni}_3(\text{Nb}, \text{Mo})$ .

### ***1.6.4 Частицы $\delta$ -фазы***

Важную роль в получении необходимых механических свойств никелевых сплавов играют форма, расположение и объёмная доля  $\delta$ -фазы, образованной соединением никеля и ниобия ( $\text{Ni}_3\text{Nb}$ ). В работах авторов [95, 114, 115] сказано, что при высоких температурах (около 980°C),  $\delta$ -фаза имеет игольчатую форму и

образуется в дефектах двойникования и на границах зёрен или межфазных границах. В работе [116] автор выявил, что, при наличии в сплаве никеля частиц фазы Лавеса и увеличение в её близи концентрации ниобия, приводит к активному образованию  $\delta$ -фазы и их росту на межфазной границе. Авторы исследований в работах [117, 118] установили, что, при температуре от 750°C до 850°C, формируются выделения  $\delta$ -фазы пластинчатой формы в результате переходной реакции  $\gamma'' \rightarrow \delta$ .

В работах [119–121] отмечено, что игольчатая форма  $\delta$ -фазы отрицательно сказывается на механических свойствах никелевого сплава, а также снижает объёмную долю  $\gamma''$ -фазы в областях рядом с  $\delta$ -фазой, а это ускоряет процесс деградации высоколегированного никелевого сплава. Однако в работах [122, 123] авторы пришли к выводу, что, если частицы  $\delta$ -фазы имеют пластинчатую или сферическую форму и они пропорционально распределены по всему объёму материала, то они, укрепляют межзёренные и межфазные границы, что приводит к положительному влиянию на механические свойства.

#### ***1.6.5 Фазы Лавеса***

Если сплав легирован Mo, Nb, Fe и W, которые укрепляют твёрдый раствор никеля, но и запускают процесс эвтектической реакции, в результате которой образуется и локализуется в междендритном пространстве фаза Лавеса. Согласно выводам, полученным в работах [85, 104, 124] продукты этой реакции обладают гексагональной кристаллической решеткой, а их состав описывается формулой  $(\text{Ni, Cr, Fe})_2(\text{Nb, Mo, Ti})$ . По результатам исследований, описанных в работах [125–127] состав фазы Лавеса многокомпонентный и самым активным элементом является ниобий. Образование микропустот на границах раздела с интерметаллидными выделениями и различие в модулях упругости никелевой матрицы и фазы Лавеса приводит к охрупчиванию никелевого сплава [128, 129].

Авторы работ [129, 130] сделали вывод что, в процессе сварки, охлаждение ванны расплава проходит с высокой скоростью, что уменьшает время диффузии легирующих элементов, участвующих в реакции с образованием в междендритном пространстве мелкодисперсных выделений фазы Лавеса. В работах [131, 132]

указано, что форма выделений связана с микроструктурой зерен, которая, определяется скоростью охлаждения ванны расплава или кристаллизации. Как отмечают авторы работ [125, 133] при комнатной температуре вытянутая форма частиц фазы Лавеса может привести к расколу и образованию микропор, а в условиях высокотемпературного нагружения могут образовываться трещины.

### ***1.6.6 Карбидные фаз***

В соответствии с требованиями, изложенными в технических условиях и нормативно справочной документации в высоколегированных сплавах на основе никеля содержание углерода должно быть минимальное. Это требование связано с образованием карбидов, которые имеют коэффициент линейного расширения меньше, чем у никелевой основы. В работах [85, 134] установлено, что, карбиды являются источниками микротрещин и концентраторами напряжений, это сказывается при проведении испытаний на усталость материала. Содержание углерода в никелевых сплавах должно составлять не более 0,3%, в сплаве ЭП648 содержание углерода, согласно техническим условиям, не превышает 0,1%. И такое малое содержание углерода приводит к взаимодействию его с легирующими элементами и образованию карбидов в никелевом сплаве [135, 136].

Исследователи в работах [106, 134] установили, что существуют два типа частиц карбидов. Первый блочный тип — представлен в виде отдельных частиц, которые располагаются по границам зёрен и при высоких температурах предотвращают зёрнограницное скольжение. Второй тип карбидных частиц ориентирован вдоль границ зёрен и характеризуется вытянутой формой, наличие таких частиц сказывается негативно на пластичности никелевых сплавов.

На этапе кристаллизации ванны расплава легирующие элементы, склонные к образованию карбидов взаимодействуют с углеродом и образуют первичные карбиды типа MC. Авторы работы [137] выявили, что, стабильность первичных карбидов уменьшается в порядке:  $WC > MoC > NbC > TiC$ . В работах [104, 138, 139] установлено, что в интервале температур 760°C-980°C, при взаимодействии с хромом первичные карбиды трансформируются, образуя вторичные карбиды типа

$M_{23}C_6$ . А при температуре от  $815^{\circ}\text{C}$  до  $980^{\circ}\text{C}$ , происходит формирование карбидов типа  $M_6C$ . Как установлено в работе [106], наличие карбидов в сплаве является причиной образования сварочных трещин в высоколегированных никелевых сплавах системы Ni-Cr-Mo.

### 1.7 Возможные дефекты, возникающие в процессе ПЛВ жаропрочных никелевых сплавов

**Растрескивание.** При формообразовании заготовок методом ПЛВ и последующей механической и термической обработке в них могут возникать дефекты, одним из которых является трещинообразование. В зоне роста трещины, независимо от того, развивается она с поверхности или же внутри объёма материала, формируются значительные остаточные напряжения, которые под действием знакопеременных нагрузок, воздействующих на деталь, способствуют её дальнейшему интенсивному росту, приводящему к разрушению детали.

В сварных швах могут возникать трещины, которые делятся на два типа: горячие и холодные. Горячие трещины появляются при температурах, близких к точке кристаллизации, а холодные – при более низких температурах, включая комнатную. Можно выделить четыре основные причины, приводящие к появлению трещин в сварных соединениях жаропрочных сплавов (рисунок 1.8) [140], горячие (кристаллизационные и ликвационные) и холодные (падение пластичности материала и деформационное старение).

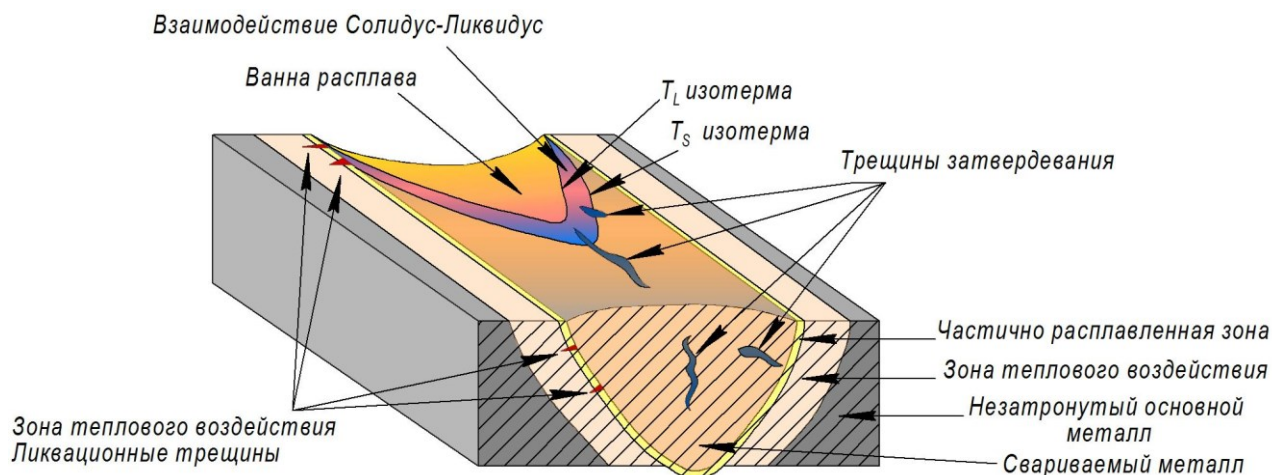


Рисунок 1.8 – Схематичное изображение различных типов трещин, которые могут образоваться во время сварки [46]

В процессе кристаллизации сплавов на основе никеля из жидкой фазы образуется аустенит. Из-за различной растворимости примесей в твёрдом и жидком металле происходит сегрегация легирующих элементов, что способствует образованию кристаллизационных трещин в сварном шве.

Сегрегация приводит к накоплению плёнок жидкости с низкой температурой плавления в межкристаллитных пространствах и вдоль границ зёрен в процессе кристаллизации. Усадка зоны расплава, вызванная кристаллизацией, вызывает накопление деформаций растяжения в сварном шве, которые могут привести к разделению зёрен на границах, полностью покрытых жидкостью. Температурный диапазон, в котором сплав подвержен кристаллизационному и ликвационному растрескиванию, определяется как температурный интервал хрупкости. Растрескивание обычно происходит в низкотемпературной области температурного интервала хрупкости, где микроструктура в основном содержит твёрдую фазу аустенита, но также содержит достаточное количество жидкого расплава, распределённого по границам зёрен.

В зоне термического влияния и в наплавленном металле могут образовываться трещины, вызванные ликвацией. В зоне термического влияния трещины появляются по границам зёрен из-за образования непрерывных жидких прослоек при высоких температурах. В наплавленном металле трещины чаще всего возникают при повторном нагреве металла валика во время многопроходной наплавки. Если жидкие прослойки не выдерживают деформаций, вызванных термомеханическими явлениями при охлаждении, то вдоль границы зёрен образуется трещина. Вероятность ликвации к границам зёрен увеличивается с увеличением количества тепла, вложенного в наплавляемый материал. Однако снизить склонность к ликвационному растрескиванию в зоне термического влияния можно, только скорректировав состав материала и микроструктуру.

В высоколегированных сплавах на основе никеля во время термического цикла наплавки может происходить оплавление границ зёрен из-за локальных разогревов выше температуры солидуса. Два основных механизма, ответственных за ликвационное растрескивание в зоне термического влияния сплавов на основе



никеля, – это механизмы сегрегации и проникновения [141]. В обоих случаях плавление границ зёрен происходит из-за снижения их температуры плавления. При сегрегации легирующие элементы диффундируют к границам зёрен в зоне термического влияния. При проникновении в сплавах на основе никеля, содержащих вторичные фазы, такие как карбиды, интерметаллиды и другие выделения с высоким содержанием растворённых веществ, происходит их растворение и дополнительное обогащение раствора примесями, что ещё больше снижает температуру ликвидуса.

В выращенных заготовках трещины, вызванные падением пластичности, могут возникать как в металле наплавочного валика, так и в зоне термического влияния. В наплавочном валике они всегда имеют межкристаллитный характер и обычно появляются в повторно нагретом валике при многопроходной наплавке. Падение пластичности – это резкое уменьшение пластичности, которое чувствительные материалы демонстрируют в диапазоне температур между температурой солидуса сплава и примерно половиной температуры солидуса [142]. Существует несколько гипотез возникновения трещин из-за падения пластичности, но единой теории, описывающей этот процесс в сплавах на основе никеля или других материалов, нет.

Повторный нагрев в никелевых сплавах может вызывать трещины не только при образовании жидких прослоек, но и в твёрдой фазе. Для дисперсно-упрочнённых сплавов, таких как никелевые суперсплавы, характерны трещины, вызванные деформационным старением. Во время термообработки сплав упрочняется за счёт выделения  $\gamma'$ -фазы ( $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$ ). Эта фаза также может выделяться во время наплавки в нерасплавленной зоне термического влияния. Температурный градиент, который образуется в зоне термического влияния во время ПЛВ, вызывает неоднородность микроструктуры, что приводит к локальному изменению прочности. Если остаточные напряжения, возникающие в процессе ПЛВ, превышают предел прочности в каком-либо месте материала во время процесса старения, то возможно возникновение трещин после термообработки (растрескивание из-за деформационного старения).

Общепризнано, что мелкозернистая равноосная структура менее подвержена растрескиванию при затвердевании, чем столбчатая микроструктура [141], что связано с лучшим сопротивлением деформации, легкостью заполнения жидкостью для заживления трещин и меньшим масштабом сегрегации [143].

**Пористость.** К образованию пористости при формообразовании заготовок методом ПЛВ могут привести следующие причины [144]:

1) захват пузырьков газа в ванне расплава во время затвердевания, например, по причинам чрезмерного перемешивания ванны расплава, пористости в МПК или испарении легирующих элементов, приводящий к образованию газовых пор;

2) быстрое затвердевание ванны расплава, приводящее к неполному выходу газа из жидкого металла;

3) образование усадочных пустот в результате затвердевания образовавшихся карманов жидкости отдельно от оставшегося расплава;

4) неправильная подготовка поверхности, что может быть причиной загрязнения ванны расплава, оказывающей влияние на поверхностное натяжение и сцепление покрытия с основанием;

5) увеличение высоты наплавляемых дорожек, приводящее при одинаковом уровне их перекрытия к росту объёма пространства между дорожками.

Как отмечают авторы работ [145-147], в наплавленном материале можно выделить два типа пор: газовые поры и поры в виде несплавлений. Газовые поры обычно имеют сферическую или эллиптическую форму с диаметром от 1 до 100 мкм и хаотично распределены в материале. Округлая форма этих пор указывает на то, что они образовались из-за газа, попавшего в ванну расплава и задержанного в расплавленном металле. МПК с газовыми порами внутри частичек приводит к образованию газовых пор в наплавленном материале. Поэтому лучше использовать для процесса ПЛВ порошки без пор. Снижение скорости сканирования и увеличение мощности лазерного излучения способствует уменьшению образования газовых пор, но не устраняет их полностью.

В отличие от газовых пор, размер несплавлений больше, а их форма похожа на клин или треугольник с острыми углами. Эти дефекты обычно наблюдаются в

зоне примыкания двух соседних слоев. Основной причиной образования несплавлений является отклонение от рационального режима, чрезмерное количество МПК при недостаточной энергии лазерного излучения приводит к отсутствию сплавления и слабой связи между слоями [148-151]. При воздействии нагрузки, особенно при одноосной растягивающей, параллельной направлению построения, острые кончики этих дефектов подвержены концентрированным локальным напряжениям, что приводит к преждевременному разрушению. По сравнению с газовыми порами, несплавления оказывают более негативное влияние на эксплуатационные характеристики изделий, полученных аддитивными технологиями, но их можно предотвратить. Эффективным способом избежать несплавления является подбор технологического режима [148].

**Деформации и остаточные напряжения.** Процесс ПЛВ является более низкотемпературным процессом по сравнению с электродуговой сваркой. Тем не менее быстрое плавление платформы построения лазерным лучом приводит к очень высоким температурным градиентам, которые в сочетании с разными комбинациями сплавляемого материала и платформы построения могут вызывать термические напряжения, приводящие к пластическим деформациям. Следует также отметить, что образовавшиеся после формообразования заготовки остаточные напряжения во многих случаях являются причиной появления трещин [54, 56, 152]. Эффективным способом снятия остаточных напряжений после процесса ПЛВ является проведение термической обработки.

### **Заключение по главе 1**

На основании обзора современного состояния вопроса применения технологии ПЛВ для изготовления заготовок деталей камер сгорания ГТД из МПК жаропрочных сплавов на никелевой основе, можно сделать следующие выводы:

1. Аддитивное производство крупногабаритных заготовок для деталей камер сгорания ГТД с помощью технологии ПЛВ является перспективной технологией, обеспечивающей возможность получать сложнопрофильные крупногабаритные

заготовки, близкие к окончательной форме деталей. При этом технология ПЛВ, позволяет значительно сократить трудоемкость и стоимость изготовления деталей.

2. В традиционном технологическом процессе используют два основных способа получения крупногабаритных кольцевых заготовок для деталей камеры сгорания ГТД – формообразование заготовок из листа и раскатка из поковки, имеющей форму кольца. Технологические процессы получения заготовок путем гибки из листа и способом раскатки более универсальны, но требуют большего количества технологических операций, что повышает, соответственно, трудоёмкость в 5–7 и 8–10 раз по сравнению с процессами получения заготовок посредством аддитивных технологий. Недостатком изготовления крупногабаритных деталей камер сгорания ГТД из раскатных колец является, то что на черновых и получистовых операциях снимается 70-80% материала. Технологические отходы при традиционных способах получения заготовок складываются из материала, удаленного на операциях предварительной механической обработки до и после сварки колец. Коэффициент использования заготовок при этом составляет всего 0,05–0,08. Для соединения толстостенных колец из жаропрочного материала используется электроннолучевая сварка и последующие обязательные операции: рентген-контроля качества сварного шва и термической обработки для снятия остаточных напряжений. В условиях традиционного серийного производства время, затраченное на изготовление кожухов камеры сгорания, составляет порядка 2...3 месяцев, технологический процесс включает порядка 196 операций. В условиях опытного производства время, затраченное на изготовление кожухов камеры сгорания, составляет порядка 5...8 месяцев. С применением технологии ПЛВ цикл производства кожухов камеры сгорания ГТД может сократиться более чем в 2,5 раза при обеспечении максимальной прочности и требуемого качества материала.

3. Разработка технологического процесса изготовления крупногабаритных заготовок для деталей камер сгорания ГТД с помощью технологии ПЛВ является сложной, комплексной, многовариантной задачей, требующей учета большого числа разнообразных факторов. Разработка же методики проектирования технологических процессов ПЛВ с базой данных влияния условий прямого

лазерного выращивания на геометрические размеры и микроструктуру с комплексом математического моделирования взаимодействия лазерного излучения для процесса ПЛВ, позволяющая выполнить численное исследование технологических параметров при выращивании заготовок из различных МПК, позволит сократить трудоемкость и стоимость на разработку новых ТП.

4. Технология изготовления заготовок с использованием ПЛВ представляет сложный процесс, на который влияет большое количество технологических параметров. Литературный обзор выявил основные технологические параметры процесса ПЛВ, влияющие на качество и точность изготавливаемых заготовок. Это такие параметры, как мощность лазера, скорость выращивания (перемещения лазерного луча), скорость подачи МПК и расфокусировка лазерного излучения.

5. Этап определения диапазона рациональных технологических параметров процесса ПЛВ является важным этапом для разработки ТП изготовления заготовок крупногабаритных деталей камеры сгорания ГТД путем моделирования взаимодействия лазерного излучения с МПК в газопорошковой струе для достижения высоких механических свойств материала заготовки. Однако представленные в литературе значения технологических параметров процесса ПЛВ отличаются из-за использования различных аддитивных установок, платформ построения, изготовленных из разных материалов и разной толщины. Описанные различия продиктованы высокой чувствительностью материала к изменению технологических параметров процесса ПЛВ. Для определения диапазона рациональных технологических параметров процесса ПЛВ результаты численного моделирования нужно подтверждать путем проведения натурных экспериментов с исследованием и контролем механических свойств.

6. Жаропрочным сплавам на никелевой основе с высоким содержанием легирующих элементов свойственно присутствие фаз, размер, форма и распределение которых в материале определяют его прочностные свойства. Распределение  $\gamma'$ - и  $\gamma''$ -фаз, образующихся в никелевых сплавах в процессе ПЛВ, а также их форма, размер, определяются скоростью охлаждения на стадии охлаждения ванны расплава, а также особенностями прохождения твёрдофазных

реакций, проходящих в ходе термической обработки и циклов термических нагрузок в ходе эксплуатации изделия.

7. Этап технологической подготовки производства крупногабаритных заготовок деталей камер сгорания ГТД с использованием технологии ПЛВ требует проведения значительного объёма исследовательских и опытных работ, в том числе работ, связанных с определением рационального технологического режима процесса ПЛВ и его влияния на механические свойства материала, с разработкой геометрии заготовок деталей, с исследованием влияния применяемых технологических параметров на точность изготовления и использования последующей термической обработки. Для достижения требуемых в конструкторской документации качества изготавливаемых заготовок, необходимо разработать методику проектирования технологического процесса, которая позволит значительно сократить затраты материальных и временных ресурсов на технологическую подготовку производства.

На основании вышесказанного можно сформулировать цель диссертационного исследования и основные задачи.

Целью диссертационного исследования является повышение производительности изготовления крупногабаритных деталей авиационных ГТД с использованием технологического процесса изготовления заготовок методом прямого лазерного выращивания на основе разработки методики, обеспечивающей получение требуемых характеристик заготовки за счёт определения рациональных условий прямого лазерного выращивания.

Для достижения поставленной цели диссертационного исследования необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать математическую модель плавления металлопорошковой композиции под воздействием лазерного излучения в процессе прямого лазерного выращивания, посредством программы PTC Mathcad выполнить численное исследование влияния параметров формообразования заготовки на расстояние до зоны расплавления для определения эффективной величины фокусного расстояния.

2. Исследовать влияние основных параметров технологического процесса ПЛВ (мощности лазерного излучения, скорости выращивания, расхода металлопорошковой композиции) на формирование геометрии заготовки, предел прочности, структуру и трещинообразование наплавляемого жаропрочного сплава ЭП648. С применением регрессионного анализа определить рациональные технологические параметры процесса ПЛВ с учётом результатов моделирования.

3. Исследовать влияние расфокусировки лазерного излучения на рельеф поверхности, отклонение геометрии и стабильность процесса плавления. Создать базу данных влияния условий прямого лазерного выращивания на геометрические размеры и микроструктуру образцов из сплава ЭП648, необходимую для проектирования технологического процесса изготовления крупногабаритных заготовок деталей авиационных ГТД.

4. Разработать методику проектирования технологического процесса для изготовления крупногабаритных заготовок деталей авиационных ГТД из жаропрочного сплава ЭП648 методом ПЛВ.

5. Разработать технологический процесс ПЛВ крупногабаритных заготовок из жаропрочных сплавов, на основе использования полученных рациональных технологических режимов сплавления, и проверить его работоспособность при изготовлении крупногабаритных заготовок деталей «Кожух наружный камеры сгорания» и «Кожух внутренний камеры сгорания» из жаропрочного сплава ЭП648 для ГТД семейства «НК». Подтвердить заявленные характеристики стендовыми испытаниями.

## ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И МЕТАЛЛОПОРОШКОВОЙ КОМПОЗИЦИИ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИАПАЗОНА РАЦИОНАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ

### 2.1 Описание процесса ПЛВ и постановка задачи

Технологический процесс изготовления заготовок для деталей камер сгорания ГТД из МПК высоколегированного жаропрочного сплава на никелевой основе осуществляется методом прямого лазерного выращивания на аддитивной установке ИЛИСТ-L изготовленной институтом лазерных и сварочных технологий, Санкт-Петербургского государственного морского технического университета (СПбГМТУ ИЛИСТ).

Установка ИЛИСТ-L собрана по модульному принципу, схема компоновки установки представлена на рисунке 2.1, состав установки приведен в таблице 2.1. Процесс проходит внутри рабочей камеры (поз. 1, рисунок 2.1), которая обеспечивает контролируемую атмосферу зоны выращивания и защиту оператора от лазерного излучения, в ней также расположены промышленный шестиосевой робот (поз. 2, рисунок 2.1) с закрепленной на нем головкой технологической (поз. 6, рисунок 2.1), двухосевой позиционер (поз. 4, рисунок 2.1), позволяющий выращивать изделия с максимальными габаритными размерами  $\varnothing 1300 \times 600$  мм, весом до 490 кг [153].

При выполнении технологического процесса ПЛВ камера заполняется инертным газом аргоном до значения на датчике кислорода менее 500 ppm. Низкое содержание кислорода в газовой среде камеры обеспечивает предотвращение процесса окисления и возгорания частиц МПК при нагреве до температур плавления. Перед началом процесса МПК засыпается в колбы порошкового питателя (поз. 8, рисунок 2.1), входящего в состав установки и предназначенного для дозирования и подачи МПК в зону наплавки. После засыпания МПК в колбу порошкового питателя под действием силы тяжести МПК оседает в желоб дозирующего диска и распределяется по канавке диска при помощи распределяющего скребка. В колбу подается транспортирующий газ аргон,



который поддерживает в ней избыточное давление. При вращении диска и достижении порцией порошка всасывающего скребка под действием аргона, происходит забор материала в магистраль, которая тянется до головки технологической (поз. 6, рисунок 2.1). В результате образуется газопорошковая смесь. При достижении головки технологической смесь разделяется на четыре потока и попадает в сопло подачи порошка (рисунок 2.2).

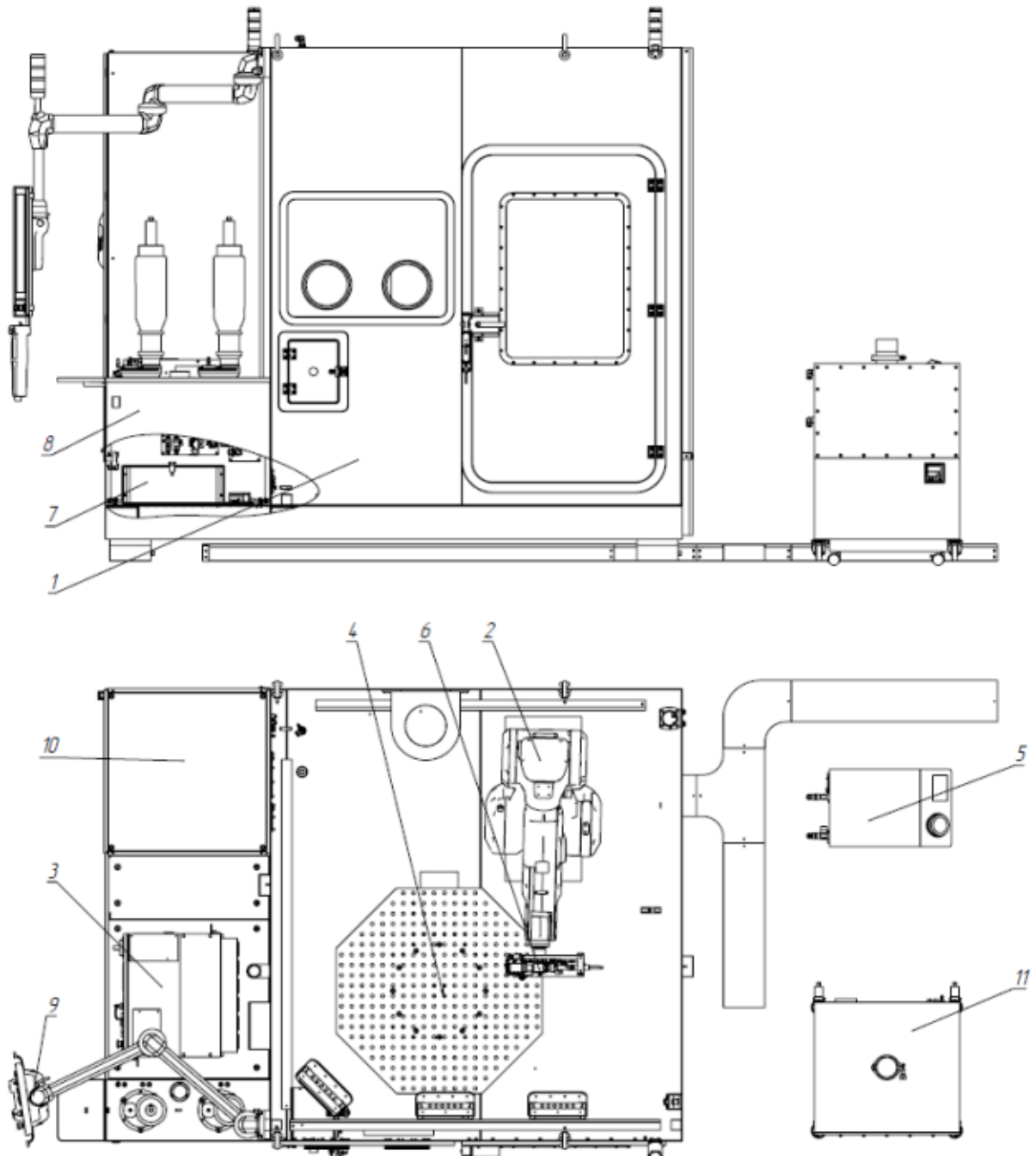


Рисунок 2.1 – Схема аддитивной установки ПЛВ ИЛИСТ-L:

- 1 – кабина технологическая герметичная; 2 – промышленный робот; 3 – контроллер робота;  
 4 – позиционер двухосевой; 5 – чиллер; 6 – головка технологическая; 7 – иттербиевый  
 волоконный лазер; 8 – порошокный питатель; 9 – консоль оператора; 10 – шкаф системы  
 автоматического управления; 11 – фильтровентиляционная установка

Таблица 2.1 – Составные части аддитивной установки ИЛИСТ-L и их назначение

| № п.п. | Наименование                                                         | Назначение                                                                                                                                                                                                                                   |
|--------|----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.     | Промышленный робот с контроллером, пультом и двухосевым позиционером | Обеспечивает требуемую взаимную ориентацию рабочего инструмента относительно обрабатываемого изделия и перемещение по заданной траектории в процессе обработки                                                                               |
| 2.     | Головка технологическая                                              | Обеспечивает подвод лазерного излучения, защитного газа и металлического порошка при реализации технологии прямого лазерного выращивания                                                                                                     |
| 3.     | Иттербиевый волоконный лазер                                         | Источник нагрева в зоне обработки                                                                                                                                                                                                            |
| 4.     | Система охлаждения лазера и технологического инструмента             | Обеспечивает тепловой режим работы волоконного лазера и технологического инструмента                                                                                                                                                         |
| 5.     | Кабина технологическая                                               | Обеспечивает контролируемую атмосферу зоны выращивания изделий и защиту оператора от лазерного излучения                                                                                                                                     |
| 6.     | Система подачи металлического порошка                                | Обеспечивает подачу наплавочного материала в головку технологическую                                                                                                                                                                         |
| 7.     | Система автоматического управления                                   | Обеспечивает управление всеми подсистемами в процессе обработки, их согласованное взаимодействие, выбор, установку, контроль и поддержание необходимых технологических параметров процесса в целом, представление информации о ходе процесса |
| 8.     | Консоль оператора                                                    | Обеспечивает управление установкой, визуализацию технологических параметров, вывод видеоизображения с коаксиальной видеокамеры                                                                                                               |

В установке ИЛИСТ-L в качестве источника нагрева в зоне наплавки используется отдельно стоящий иттербиевый волоконный лазер марки YLS-2000 компании IPG Photonics с диодной системой накачки и водяным охлаждением. Вид лазерного излучения – инфракрасный с длиной волны  $1075 \pm 5$  нм. Номинальная выходная мощность излучения – 2000 Вт с диапазоном регулирования в пределах 10-100% с временем отклика 8 мс. Модуль лазерного блока состоит из корпуса лазера, оптического волокна и оптического коннектора. Оптическое волокно служит для транспортировки лазерного излучения к сварочной оптической головке для передачи лазерного излучения на головку технологическую.

Промышленный шестиосевой робот-манипулятор Fanuc M-20iB/25, является частью системы перемещения технологической головки. Он обеспечивает требуемую взаимную ориентацию технологической головки относительно наплавляемого изделия и перемещение по заданной траектории в процессе

выращивания. Для управления роботом используется контроллер R30iB Plus. Контроллер робота состоит из блока питания, блока интерфейса пользователя, блока управления перемещением, блока памяти и блока ввода-вывода. Позиционер FANUC 2-axes servo positioner оснащен двумя осями вращения, мотором и редуктором для каждой оси, обеспечивает требуемую ориентацию обрабатываемого изделия и его перемещение по заданной траектории в процессе обработки.

Головка технологическая используется для наплавки МПК. Функциями технологической головки являются: транспортировка лазерного излучения и его фокусировка в зоне наплавки, а также обеспечение процесса наплавки необходимым количеством МПК. Головка технологическая представляет собой сборку из трех основных частей: сопла подачи МПК (рисунок 2.2), блока юстировки (рисунок 2.3) и головки оптической сварочной IPG FLW D30L (рисунок 2.4).

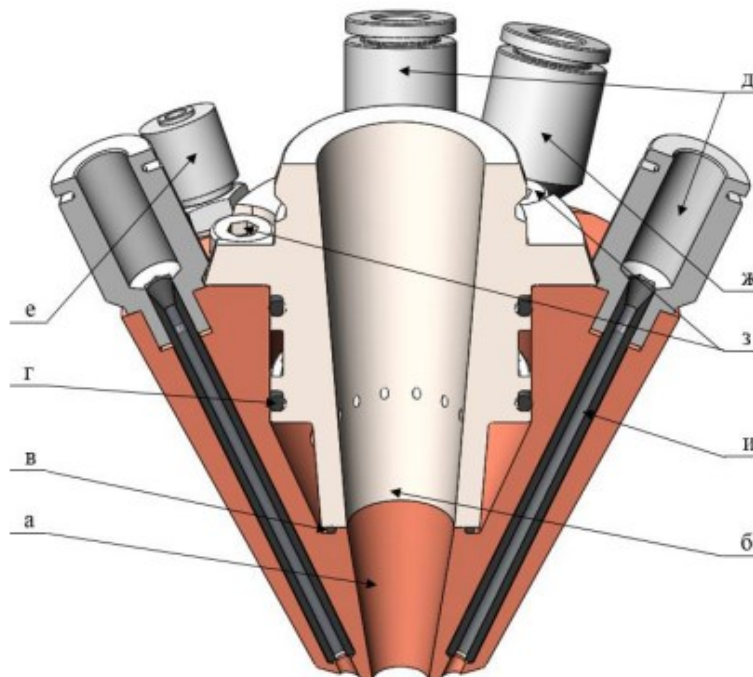


Рисунок 2.2 – Сопло подачи МПК в разрезе

Сопло подачи порошка (рисунок 2.2) состоит из медного конуса (а), холодильника (б), уплотнительных колец (в, г), фитингов для подключения шлангов подачи порошка (д), воды (е), аргона (ж), винтов крепежных (з), трубочек подачи порошка (и).

Блок юстировки (рисунок 2.3) состоит из корпуса блока юстировки (а), опорной пластины (б), трубы юстировки (в), винтов юстировочных (г), винтов соединительных (д), колец уплотнительных (е, ж), винтов установочных (з), винтов установочных подпружиненных (и).

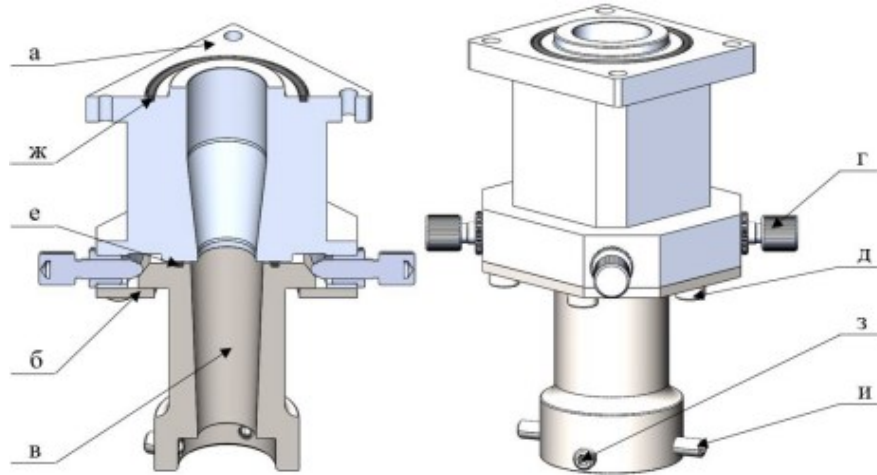


Рисунок 2.3 – Блок юстировки в разрезе



Рисунок 2.4 – Головка оптическая сварочная IPG FLW D30L

Головка оптическая сварочная IPG FLW D30L (рисунок 2.4) принимает лазерное излучение с оптического волокна и формирует пучок, подавая его в точку в зависимости от параметров заданной программы и настроек. Через трубочки сопла в

зону наплавки подается металлический порошок. В зоне пересечения лазерного излучения и порошкового материала за счет высоких температур происходит расплавление МПК с образованием ванны расплава. При перемещении инструмента по заданной программой траектории выполняется процесс ПЛВ.

МПК из колбы порошкового питателя, который осуществляет массовое дозирование и подачу порошка в сопло, по антистатической трубке в виде газопорошковой смеси поступает в сопло подачи порошка. Задача сопла – сформировать сфокусированную газопорошковую струю, которая доставит максимальное количество МПК в ванну расплава. Лазерное излучение через технологическую головку и сопло падает на поверхность платформы построения. Часть излучения отражается (30-50%) остальное поглощается, и его энергия переходит в тепловую энергию материала. Платформа построения закрепляется на двухосевом позиционере для контролируемого перемещения по заданной в управляющей программе траектории.

Чтобы наплавить валик, необходимо создать на поверхности платформы построения ванну расплава. Это означает, что количество энергии, поглощаемое платформой построения, должно быть достаточным для разогрева металла выше температуры плавления. Генерируемая тепловая энергия стремится покинуть активную зону плавления (ванну расплава) всеми доступными методами, в основном за счёт теплопроводности. Если платформа построения массивная, холодная, то она будет поглощать тепло и рассеивать его в атмосферу камеры построения. Если на платформе построения уже присутствует выращенная часть заготовки, то она уже прогрета и тепло рассеивается не так быстро. Ширина наплавляемого валика определяется шириной ванны расплава, которая в свою очередь зависит от набора технологических параметров (мощности лазерного излучения, скорости движения лазерного излучения, размера пятна лазера) и от условий теплоотвода (температуры и геометрии заготовки, химического состава МПК, его теплоёмкости и теплопроводности). При выращивании заготовки первые валики на платформе построения узкие за счет хорошего отвода тепла в платформу, а по мере прогревания заготовки и платформы построения, они становятся шире,

пока тепловой режим не стабилизируется. По мере выращивания разных элементов заготовки условия теплоотвода могут изменяться, соответственно, будет изменяться и ширина валика. При изготовлении небольших изделий это может быть критично, для крупногабаритных изделий условия теплоотвода изменяются слабо и особого влияния не оказывают. После наплавления слоя технологическая головка, закрепленная на промышленном роботе, смещается вверх на величину, равную толщине наплавляемого слоя и процесс повторяется снова до тех пор, пока заготовка не будет полностью выращена. В процессе ПЛВ необходимо обеспечивать полное расплавление МПК и сплавление с платформой построения на начальном этапе выращивания или с нижележащими слоями, а также обеспечить надежное перекрытие между соседними наплавляемыми валиками, с целью исключения непроплавов и получения требуемых механических свойств.

В связи с этим поставлена задача математического моделирования процесса ПЛВ в плане разработки математической модели плавления МПК под воздействием лазерного излучения в процессе ПЛВ для определения эффективного фокусного расстояния в зависимости от технологических параметров выращивания и установления диапазона рациональных технологических параметров процесса ПЛВ путем обработки данных численного эксперимента.

## **2.2 Разработка модели взаимодействия лазерного излучения и металлопорошковой композиции в процессе прямого лазерного выращивания**

### ***2.2.1 Исследование перемещения металлопорошковой композиции и анализ предпосылок для ее сплавления***

Металлопорошковая композиция через сопло подается коаксиально лазерному излучению в ванну расплава, по мере продвижения частиц МПК происходит поглощение лазерной энергии. Частицы МПК нагреваются и расплавляются, далее расплав продолжает нагреваться выше температуры плавления. При этом энергия лазерного луча, проходящего через газопорошковую

струю, ослабевает. Некоторая часть энергии лазерного излучения проходит через газопорошковую струю и расплавляет МПК на поверхности платформы построения, образуя ванну расплава. Частицы МПК вовлекаются в ванну расплава и по мере удаления лазерного излучения затвердевает, образуя новый слой. Принципиальная схема процесса показана на рисунке 2.9. При этом моделируются две части взаимодействия МПК и лазерного излучения: распространение лазерного излучения в газопорошковой струе и нагрев МПК. Допущения, используемые при моделировании: лазерное излучение имеет постоянное сечение и интенсивность лазерного излучения постоянна в пределах сечения. Кроме того, предполагается, что вся газопорошковая смесь поступает в область наплавки в пределах сечения лазерного излучения.

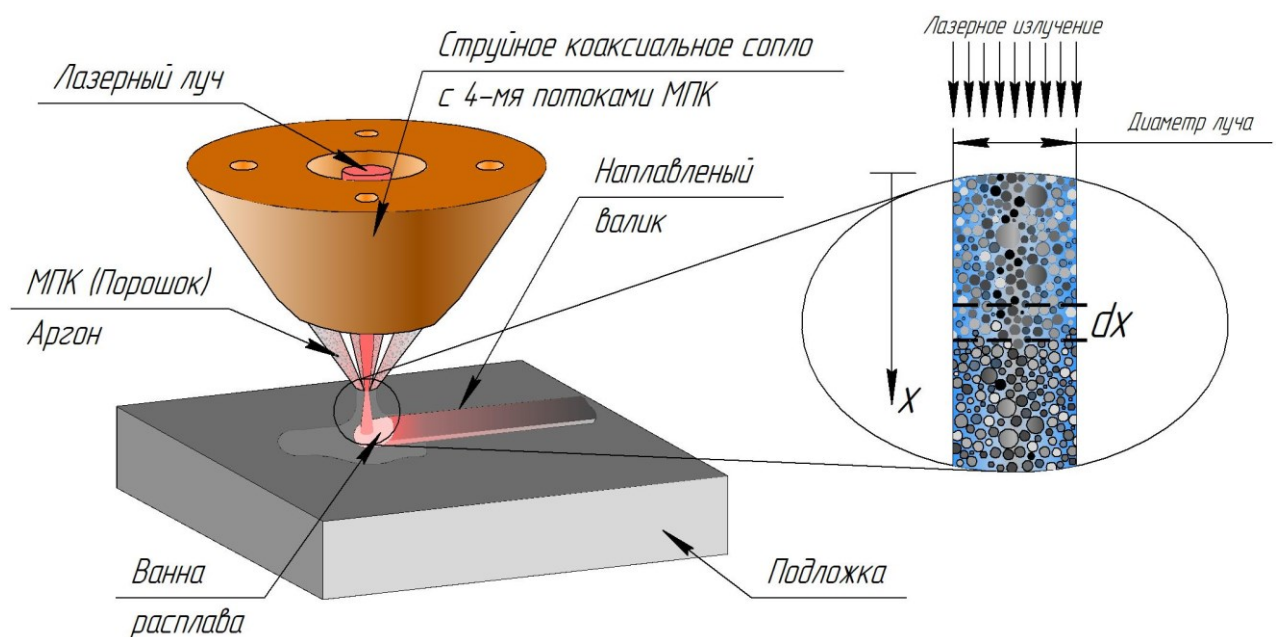


Рисунок 2.9 – Схема взаимодействия лазерного излучения с МПК

Прочность полученного материала будет определяться прочностью границы, сформированной при сплавлении частиц МПК. Величина этой прочности определяется величиной площади контакта между частицами, видом топокхимической реакции, временем её протекания, то есть степенью её завершения и этапом последующего остывания системы, в котором происходит как дальнейшее развитие химического взаимодействия, так и формирование остаточных напряжений с возможным разрывом уже сформированных химических связей.

Достаточно очевидно, что в таком процессе из-за его кратковременности и отсутствия внешних воздействий увеличение площади контакта частиц и увеличение прочности их приваривания возможно только при их переводе из твердого в жидкое состояние.

Как показывают результаты исследований формы порошка (см. п. 3.2) частицы имеют шарообразную форму с рассеиванием диаметров в широких пределах, однако основной вклад массу изделия (более 98%) вносит порошок с рассеиванием диаметров в пределах 140...200 мкм.

Таким образом, для определения технологического режима, обеспечивающего возможность сваривания частиц порошка, необходимо определить границы параметров режима, при которых происходит полное расплавление каждой индивидуальной частицы МПК в газопорошковой струе и в ванне расплава на поверхности заготовки.

### ***2.2.2 Передача энергии лазерного излучения частице порошка и моделирование процесса ввода тепловой энергии***

Рассмотрим тепловой поток от лазерного излучения, распространяющийся через столб газопорошковой струи, как показано на рисунке 2.9, МПК сферической формы с преимущественным диапазоном рассеивания диаметров в пределах  $D_{II} = (140...200)$  мкм. Частицы МПК, движущиеся в этом столбе со скоростью  $v = 3,5$  м/с, нагреваются через верхнюю половину поверхности частицы МПК, потоком лазерного излучения мощностью,  $Q_{\text{лазер}} = 2000$  Вт. Учитывая, что размеры порошка  $D_{II}$  меньше размера диаметра пятна лазерного излучения в фокальной плоскости  $D_{\text{лазер}} = 2,5$  мм, необходим анализ энергетических и пространственно-временных характеристик процесса ввода энергии оптического (электромагнитного по физической природе) лазерного излучения в металлическое шарообразное твердое тело.

Для эффективной лазерной обработки материалов предпочтительно использовать моду  $TEM_{00}$  с круговой поляризацией излучения [154]. Эта мода обеспечивает плотность энергии излучения и большую равномерность обработки,



для которой коэффициент поглощения излучения материалом зависит только от угла падения излучения на поверхность. В установке ПЛВ ИЛИСТ-L используется лазер марки YLS-2000 компании IPG Photonics, который обладает такими характеристиками моды и поляризации.

Авторы в работах [155-158] моделируют лазерное излучение круговым источником с распределением плотности потока энергии в фокальной плоскости излучения равномерно или по нормальному закону. Плоский круговой источник с нормальным законом распределения плотности потока энергии в фокальной плоскости излучения  $I(r)$  моделируется следующим выражением:

$$I(r) = I_0 \exp(-k_c r^2), \quad (2.1)$$

где  $I_0$  – величина максимальной плотности потока энергии в фокальной плоскости при  $r = 0$ ,  $k_c$  – коэффициент сосредоточенности потока энергии.

В соотношении (2.1) предполагают либо, что энергия лазерного излучения распределена на всей плоскости  $r \in [0, \infty)$ , либо вся энергия лазерного излучения сосредоточена в пределах круга с диаметром  $D_{\text{лазер}}$ .

Параметры  $I_0$  и  $k_c$  связаны с полной мощностью всего потока энергии лазерного излучения  $Q_{\text{лазер}}$  и диаметром  $D_{\text{лазер}}$  пятна лазерного излучения в фокальной плоскости на основе интегрирования соотношения (2.1) по площади, что дает:

$$Q_{\text{лазер}} = \frac{\pi I_0}{k_c} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{k_c D_{\text{лазер}}^2}{4}\right) \right]. \quad (2.2)$$

Учитывая, что лазерное излучение сосредоточено в пределах окружности пятна лазера в фокальной плоскости диаметром  $D_{\text{лазер}}$  с полной мощностью всего потока энергии лазера  $Q_{\text{лазер}}$  и предполагая, что плотность излучения уменьшается в  $e^{-2} = 0,135$  раз на окружности с диаметром  $D_{\text{лазер}}$  по сравнению с плотностью потока энергии  $I_0$  в центре круга, получим:

$$I_0 = \left( \frac{8Q_{\text{лазер}}}{0,865\pi D_{\text{лазер}}^2} \right), k_c = \frac{8}{D_{\text{лазер}}^2}. \quad (2.3)$$

Необходимо учитывать, что соотношение (2.1) представляет собой модельное и удобное с математической точки зрения описание распределения лазерного излучения, а также других высокоэнергетических источников тепла. Это соотношение обычно применяется для описания движения источника тепла вдоль поверхностей с низкой кривизной и площадью, превышающей размеры области действия лазерного пучка.

Для исследования процесса воздействия лазерного излучения на поверхность, особенно в случае сферической поверхности, правильным математическим представлением является модель плоского кругового источника с равномерным распределением плотности потока энергии в фокальной плоскости излучения. В этой модели плотность потока энергии излучения принимает постоянное значение  $I$  внутри окружности лазерного пятна с диаметром  $D_{\text{лазер}}$ . Величина этой плотности потока энергии лазерного излучения связана с полной мощностью всего потока энергии  $Q_{\text{лазер}}$ , проходящего через зону, ограниченную окружностью лазерного пятна в фокальной плоскости соотношением:

$$I = I_{\text{ср}} = \frac{4Q_{\text{лазер}}}{\pi D_{\text{лазер}}^2} \quad (2.4)$$

При этом величина полной мощности всего потока энергии лазерного излучения  $Q_{\text{лазер}}$ , выходящая из оптоволоконной системы и проходящая через зону, ограниченную окружностью лазерного пятна в фокальной плоскости в соотношениях (2.2) и (2.4) не совпадает и может быть меньше величины мощности лазерного источника  $Q_{\text{лазер}}$ , приводимой в технической документации и определяется специальными измерениями.

Однако только часть этой плотности потока лазерного излучения (2.1) или (2.4) преобразуется в плотность теплового потока, который нагревает материал. Определенная часть этого потока, в силу физических законов взаимодействия электромагнитного излучения с веществом, переизлучается приповерхностным слоем материала и рассеивается в окружающем пространстве, часть потока отражается от поверхности из-за падения излучения под углом отличным от нормального.

Для анализа указанных потерь лазерного излучения применяется коэффициент оптического поглощения  $k_{\text{л}}$ . Для описания взаимодействия лазерного излучения с металлами применяются уравнения Френеля, которые позволяют определить зависимость коэффициента отражения от комплексного показателя преломления материала, а также от вида поляризации электромагнитной волны и угла падения излучения на поверхность [155]. Для металлических сплавов при нормальном падении излучения отражательная способность изменяется в диапазоне от 0,95 до 0,5, при этом коэффициент поглощения излучения варьируется в диапазоне от 0,05 до 0,5 в зависимости от марки материала, состояния его поверхности и поляризации электромагнитной волны.

При нормальном падении излучения на поверхность, коэффициент поглощения излучения зависит от угла падения и поляризации электромагнитной волны. Исследования показывают, что при линейной и эллиптической поляризации происходит существенно большее изменение поглощаемой мощности от угла падения по сравнению с круговой поляризацией электромагнитной волны [155, 156, 158].

В случае использования круговой поляризации с модой  $TEM_{00}$  в лазере, коэффициент поглощения излучения не зависит от угла между направлением вектора напряженности электрического поля излучения и нормалью к поверхности. Однако он зависит только от угла падения излучения на поверхность и пропорционален косинусу этого угла. Это свойство используется в современных лазерах, применяемых для материалобработки, включая лазер, который использовался в данной работе.

### Распространение лазерного излучения

Исследуем процесс передачи тепла от лазерного излучения проходящий через столб МПК в газопорошковой струе (рисунок 2.9). Построим диск толщиной  $dx$ . Изменение теплового потока лазерного излучения может быть рассчитано с помощью энергетического баланса следующим образом:

$$Q_{\text{лазер}}(x + dx) = Q_{\text{лазер}}(x) - N dx A_p k_{\text{л}} Q_{\text{лазер}}(x), \quad (2.5)$$

где  $N$  – насыпная плотность МПК,  $A_p$  – проекционная площадь сферического порошка,  $k_l$  – коэффициент поглощения лазерного излучения материала МПК,  $Q_{\text{лазер}}(x)$  – тепловой поток лазерного излучения в точке  $x$ , т.е. точке, положение которой соответствует расстоянию до неё от точки начала взаимодействия лазерного луча с МПК.

Из уравнения (2.5) для бесконечно малых значений  $dx$  можно получить соответствующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{dQ_{\text{лазер}}}{dx} = -NA_p k_l Q_{\text{лазер}}(x), \quad (2.6)$$

решением которого является зависимость, известная как закон Бера-Ламберта:

$$Q_{\text{лазер}}(x) = Q_{\text{лазер}}(0) \text{Exp}[-NA_p k_l x]. \quad (2.7)$$

Рассмотрим теплообмен в МПК при действии на него лазерного излучения. Как отмечают авторы работы [159], число Био, для порошкового материала  $Bi = h L_c / k$ , и очень мало (гораздо меньше 0,1). Здесь  $h$  – коэффициент теплоотдачи от порошка к его окружению,  $L_c$  – характерная длина ( $r/3$  для сферы радиусом  $r$ ),  $k$  – теплопроводность материала порошка. Если число Био меньше 0,1, то изменения температуры внутри порошинок очень малы. Следовательно, теплообмен можно смоделировать методом сосредоточенных параметров [160]:

$$\rho V v_p \frac{dH}{dx} = k_l \int_A Q_{\text{лазер}}(x) \vec{i} \cdot \vec{n} dA - \varepsilon \sigma A (T^4 - T_{\text{окр.}}^4), \quad (2.8)$$

где  $\rho$  – плотность материала МПК,  $C_p$  – теплоемкость,  $V$  – объёмный расход МПК,  $v_p$  – проекция скорости движения МПК в направлении  $x$ ,  $H$  – энтальпия,  $A$  – площадь проекции поверхности порошинки в направлении  $x$ ,  $\vec{i}$  – единичный вектор в направлении  $x$ ,  $\vec{n}$  – внешняя нормаль к поверхности порошка,  $T$  – температура МПК,  $T_{\text{зг}}$  – температура защитного газа,  $\varepsilon$  – коэффициент излучения,  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана,  $T_{\text{окр.}}$  – температура окружающей среды.

Уравнение (2.8) представляет собой энергетический баланс МПК при её падении на платформу построения. Для сферического порошка:  $V = \frac{4}{3} \pi r^3$  и

$A = 4\pi r^2$ , где  $r$  – радиус частицы порошка (мкм). Тогда интеграл от теплового потока лазера приобретает вид:  $k_l \pi r^2 Q_{\text{лазер}}$ . Энергетический баланс МПК, уравнение (2.8) можно представить в виде:

$$\rho v_p \frac{r_{cp}}{3} \frac{dH}{dx} = \frac{1}{4} k_l \cdot Q_{\text{лазер}}(x) - h(T - T_{\text{зг}}) - \varepsilon \sigma (T^4 - T_{\text{окр}}^4), \quad (2.9)$$

где  $r_{cp}$  – средний радиус порошинок МПК.

В уравнении (2.9), называемом формулой энтальпии, имеются две зависимые переменные – энтальпия  $H$  и температура  $T$ . Оно очень удобно для моделирования процесса плавления МПК. Однако его необходимо дополнить уравнением состояния, связывающим энтальпию и температуру и наоборот:

$$H - H_{\text{э}} = \begin{cases} C_{\text{тв}}(T - T_{\text{э}}), & T < T_{\text{пл}}, \\ \lambda_{\text{пл}} + C_{\text{тв}}(T_{\text{пл}} - T_{\text{э}}), & T = T_{\text{пл}}, \\ C_{\text{жс}}(T - T_{\text{пл}}) + C_{\text{тв}}(T_{\text{пл}} - T_{\text{э}}) + \lambda_{\text{пл}}, & T > T_{\text{пл}}, \end{cases} \quad (2.10)$$

или

$$T = \begin{cases} \frac{H - H_{\text{э}}}{C_{\text{тв}}} + T_{\text{э}}, & H < H_{\text{пл}}, \\ T_{\text{пл}}, & H_{\text{пл}} < H < H_{\text{пл}} + \lambda_{\text{пл}}, \\ \frac{H - H_{\text{пл}} - \lambda_{\text{пл}}}{C_{\text{жс}}} + T_{\text{пл}}, & H > H_{\text{пл}} + \lambda_{\text{пл}}, \end{cases} \quad (2.11)$$

$$\text{где } H_{\text{пл}} = C_{\text{тв}}(T_{\text{пл}} - T_{\text{э}}) + H_{\text{э}}. \quad (2.12)$$

Здесь  $H_{\text{э}}$  – эталонная энтальпия;  $H_{\text{пл}}$  – энтальпия плавления;  $T_{\text{э}}$  – эталонная температура;  $T_{\text{пл}}$  – температура плавления;  $C_{\text{тв}}$  – теплоемкость твердого тела;  $C_{\text{жс}}$  – теплоемкость жидкого расплава;  $\lambda_{\text{пл}}$  – удельная теплота плавления.

В итоге уравнение (2.9) представляет собой нелинейное дифференциальное уравнение первого порядка, с начальным условием на поверхности частицы МПК:

$$T = \frac{T_i \cdot a \cdot t}{x^2} = 0, \quad (2.13)$$

где  $a$  – коэффициент температуропроводности,  $t$  – время. Тогда начальная энтальпия может быть найдена с помощью уравнения (2.10).

Математическая модель, описываемая уравнениями (2.7), (2.9)–(2.12), может быть решена численно, с использованием метода Эйлера. Конечно-разностная форма уравнения (2.9) имеет вид:

$$H_n = H_{n-1} + \frac{3\Delta x}{\rho C_p v_p r_{cp}} \times \left( \frac{k_l}{4} Q_{\text{лазер}}(x_{n-1}) - h(T_{n-1} - T_{\text{зг}}) - \varepsilon \sigma (T_{n-1}^4 - T_{\text{окр}}^4) \right). \quad (2.14)$$

Подстрочные индексы « $n-1$ » и « $n$ » обозначают, соответственно, текущий и следующий временные шаги. Уравнения (2.10)–(2.12) представляют собой простые алгебраические функции, которые реализованы в виде функциональных подпрограмм. В таблицах 2.13 и 2.14 приведены данные о температуре и энтальпии МПК жаропрочного сплава на никелевой основе ЭП648. Средний диаметр частицы МПК  $D_{\Pi} = 200$  мкм, мощность лазера составляет 2000 Вт.

Таблица 2.13 – Свойства МПК жаропрочного сплава ЭП648 [161]

| Свойство                                                       | Символ         | Значение              |
|----------------------------------------------------------------|----------------|-----------------------|
| Температура плавления, К                                       | $T_{пл}$       | 1673,15               |
| Температура кипения, К                                         | $T_{кип}$      | 1973,15               |
| Плотность материала МПК, кг/м <sup>3</sup>                     | $\rho$         | 8747,9                |
| Теплопроводность 25/500/900 °С, Вт/м К                         | $k$            | 22/46/60              |
| Теплоемкость твердого тела 100/500/900 °С, Дж/кг К             | $C_{тв}$       | 105/125/140           |
| Теплоемкость жидкого расплава, Дж/кг К                         | $C_{ж}$        | 302,08                |
| Коэффициент поглощения лазерного излучения                     | $k_l$          | 0,1                   |
| Удельная теплота плавления, кДж/кг                             | $\lambda_{пл}$ | 303                   |
| Эталонная температура, К                                       | $T_0$          | 200                   |
| Эталонная энтальпия, Дж/кг                                     | $H_0$          | 0                     |
| Постоянная Стефана-Больцмана, Вт/м <sup>2</sup> К <sup>4</sup> | $\sigma$       | $5,76 \times 10^{-8}$ |

Таблица 2.14 – Параметры процесса ПЛВ

| Параметр                                     | Символ             | Значение |
|----------------------------------------------|--------------------|----------|
| Тепловой поток лазера, Вт/м <sup>2</sup>     | $Q_{\text{лазер}}$ | 346,6    |
| Насыпная плотность МПК, г/см <sup>3</sup>    | $N$                | 4,9      |
| Скорость газопорошковой струи МПК, м/с       | $V_{стр.}$         | 3,5      |
| Средний принятый радиус частиц МПК, мм       | $r_{cp,пр.}$       | 0,1      |
| Расстояние перемещения МПК, мм               | $S$                | 11       |
| Радиус газопорошковой струи МПК, мм          | $R_{стр.}$         | 1,25     |
| Начальная температура, К                     | $T_{нач}$          | 300      |
| Температура защитного газа, К                | $T_{зг}$           | 300      |
| Температура окружающей среды, К              | $T_{окр}$          | 300      |
| Коэффициент теплоотдачи, Вт/м <sup>2</sup> К | $h$                | 50       |

На рисунке 2.10 показаны зависимости температуры и энтальпии от  $x$  ( $x$  – расстояние от точки начала взаимодействия лазерного луча с МПК до зоны её

полного расплавления). Как и ожидалось, энтальпия МПК растет с увеличением расстояния  $x$ . Кривая имеет нелинейный характер, что свидетельствует о наличии конвекции лазерного излучения. Из температурной кривой хорошо виден характерный процесс плавления. Частицы МПК начинают расплавляться при  $x = 3,5$  мм и полностью расплавляются при  $x = 4,51$  мм. После этой точки МПК, как и следовало ожидать, продолжает поглощать лазерную энергию, повышая свою температуру.

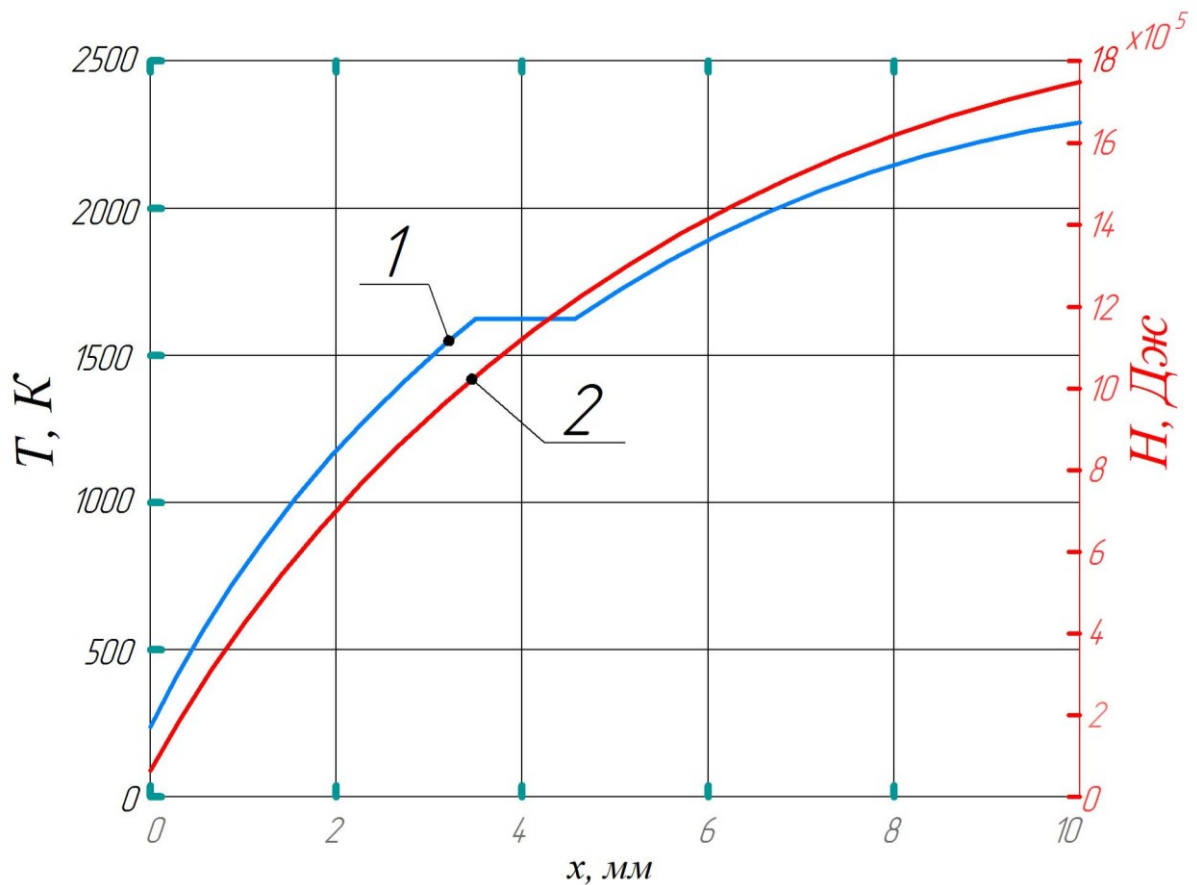


Рисунок 2.10 – Зависимости температуры (1) и энтальпии МПК (2) от величины  $x$  при мощности лазера 2000 Вт,  $N = 4,9$  г/см<sup>3</sup>,  $r_{ср.} = 0,1$  мм и  $V_{смп} = 3,5$  м/с

Для определения технологического режима, обеспечивающего возможность расплавления частиц порошка, и определения диапазона параметров технологического режима процесса ПЛВ, при котором происходит полное расплавление каждой частицы МПК в газопорошковой струе с образованием ванны расплава на поверхности заготовки, можно использовать представленную модель.

Был выполнен значительный объем численного моделирования для понимания сути протекающего процесса нагрева и плавления частиц МПК разных размеров при различных условиях режима прямого лазерного выращивания.

### **Исследование влияния скорости газопорошковой струи МПК**

Исследовано влияние скорости газопорошковой струи на расстояние до зоны расплавления МПК при следующих параметрах процесса: мощность лазера – 2000 Вт, средний радиус частиц МПК – 100 мкм, насыпная плотность МПК – 4,9 г/см<sup>3</sup>. В таблице 2.15 приведены результаты зависимости расстояния до зоны расплавления МПК и объемного расхода МПК от скорости газопорошковой струи.

Таблица 2.15 – Расстояние до зоны расплавления металлопорошковой композиции, объёмный расход и ширина валика в зависимости от скорости газопорошковой струи

| Скорость газопорошковой струи, м/с | Расстояние до зоны расплавления, мм | Объёмный расход МПК, мм <sup>3</sup> /с | Ширина валика, мм |
|------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------|
| 3,0                                | 2,23                                | 6,25                                    | 2,51              |
| 3,5                                | 4,49                                | 12,49                                   | 2,63              |
| 4,0                                | 7,11                                | 18,74                                   | 2,69              |
| 4,5                                | 10,10                               | 24,97                                   | 2,71              |

Из данных таблицы 2.15 видно, что с увеличением скорости движения порошка увеличивается расстояние до его расплавления. Это вполне ожидаемый эффект. Также видна зависимость объемного расхода МПК от скорости её движения в газопорошковой струе. При движении лазерного луча по платформе построения образуется наплавленный валик. Этот валик является базовым параметром процесса ПЛВ. Точность процесса ПЛВ напрямую зависит от объемного расхода МПК, который в свою очередь, зависит от скорости наплавки и формы поперечного сечения валика. Из таблицы 2.15 видно, что ширина единичного валика увеличивается с ростом скорости газопорошковой струи МПК. Таким образом, точность уменьшается с увеличением скорости движения МПК.

Площадь поперечного сечения валика представляет собой полукруг, его ширина составляет:



$$W = 2 \cdot \sqrt{\frac{V_{\text{расход порошка}} \cdot \pi}{V_{\text{наплавки}}}}. \quad (2.14)$$

Ширина валика напрямую связана с точностью изготавливаемой заготовки.

### Исследование влияния мощности лазера

Исследовано влияние мощности лазера на расстояние до зоны расплавления порошинок при следующих параметрах процесса: радиус порошинок МПК – 100 мкм, скорость газопорошковой струи – 3,5 м/с, насыпная плотность МПК – 4,9 г/см<sup>3</sup>. В таблице 2.16 приведены результаты численного моделирования изменения расстояния до зоны расплавления МПК от мощности лазерного излучения.

Таблица 2.16 – Расстояние до зоны расплавления металлопорошковой композиции, объёмный расход и ширина валика в зависимости от мощности лазера

| Мощность лазера,<br>Вт | Расстояние до зоны<br>расплавления, мм | Объёмный расход МПК,<br>мм <sup>3</sup> /с | Ширина валика,<br>мм |
|------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------|
| 1600                   | 7,12                                   | 12,5                                       | 2,5                  |
| 1800                   | 4,81                                   | 12,5                                       | 2,5                  |
| 2000                   | 4,49                                   | 12,5                                       | 2,5                  |

С увеличением мощности лазерного излучения, как следует из анализа данных таблицы 2.16, расстояние до зоны расплавления уменьшается. Вместе с тем объёмный расход и ширина валика остаются постоянными, т.е. не зависят от мощности лазера.

### Исследование влияния насыпной плотности МПК

Параметры процесса: радиус порошинок МПК – 100 мкм, скорость газопорошковой струи – 3,5 м/с, мощность лазера – 2000 Вт. В таблице 2.17 представлены результаты исследования влияния насыпной плотности МПК на расстояние до зоны расплавления МПК, объёмный расход и ширину валика. Из приведенных данных видно, что с ростом насыпной плотности МПК увеличиваются как расстояние до зоны расплавления МПК, так и объёмный расход, и ширина валика.

Таблица 2.17 – Расстояние до зоны расплавления металлопорошковой композиции, объемный расход и ширина валика в зависимости от насыпной плотности

| Насыпная плотность<br>МПК, г/см <sup>3</sup> | Расстояние до зоны<br>расплавления, мм | Объемный расход<br>МПК, мм <sup>3</sup> /с | Ширина<br>валика, мм |
|----------------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------|
| 3,0                                          | 4,22                                   | 5,01                                       | 2,3                  |
| 4,9                                          | 4,49                                   | 12,5                                       | 2,5                  |
| 6,0                                          | 4,80                                   | 19,99                                      | 2,7                  |

### Исследование влияние радиуса частиц МПК

Рассмотрено влияние радиуса частиц МПК. Заданы следующие параметры процесса: скорость газопорошковой струи 3,5 м/с, мощность лазера 2000 Вт, насыпная плотность МПК 4,9 г/см<sup>3</sup>. В таблице 2.18 приведены зависимости расстояния до зоны расплавления МПК, объемного расхода и ширины валика от радиуса частиц МПК.

Таблица 2.18 – Расстояние до расплавления порошка, объемный расход и ширина дорожки в зависимости от радиуса порошка

| Радиус частиц МПК,<br>мкм | Расстояние до зоны<br>расплавления, мм | Объемный расход<br>МПК, мм <sup>3</sup> /с | Ширина валика, мм |
|---------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------|
| 75                        | 2,78                                   | 3,7                                        | 2,1               |
| 100                       | 4,49                                   | 12,5                                       | 2,51              |
| 125                       | 7,07                                   | 29,6                                       | 2,71              |

Данные, представленные в таблице 2.18, позволяют оценить влияние среднего радиуса частиц МПК на расстояние до зоны расплавления, а также объемный расход и ширину валика. Видно, что с ростом радиуса частиц МПК наблюдается рост всех характеристик, указанных в таблице 2.18.

Проведенные исследования позволили установить, что разработанная математическая модель взаимодействия лазерного излучения и МПК в процессе ПЛВ, использует для моделирования теплообмена внутри частицы МПК закон поглощения лазерного излучения Бера-Ламберта и метод сосредоточенных параметров. Необходимая для полного расплавления МПК энергия лазерного излучения определялась через накопленную частицами порошка энтальпию до момента их полного расплавления. Полученное дифференциальное уравнение первого порядка приращения энтальпии частицы решается методом Эйлера в

стандартном программном продукте и позволяет эффективно провести численный расчет и анализ основных технологических параметров процесса ПЛВ для МПК жаропрочного сплава на никелевой основе ЭП648 и других.

Отличием разработанной аналитической математической модели от известных решений постановкой задачи учета полноты плавления МПК вне зоны ванны расплава.

Численный и аналитический методы были успешно протестированы и показали хорошую сходимость. При выполнении расчетов в данной работе величина  $\Delta x = x_n - x_{n-1}$  составила  $10^{-7}$  м. Результаты численного моделирования показали значительное влияние мощности лазерного излучения, скорости движения МПК в газопорошковой струе, насыпной плотности МПК и радиуса частиц МПК на расстояние до зоны расплавления, объемный расход МПК и ширину наплавочного валика.

По результатам численного эксперимента, базирующегося на разработанной математической модели, установлены диапазоны рациональных значений технологических параметров процесса ПЛВ для жаропрочного сплава на никелевой основе ЭП648, представленные в таблице 2.19.

Таблица 2.19 – Диапазоны рациональных значений технологических параметров процесса прямого лазерного выращивания

| № п/п | Наименование параметра  | Диапазон значений |
|-------|-------------------------|-------------------|
| 1.    | Мощность, Вт            | 1800-2000         |
| 2.    | Скорость наплавки, мм/с | 23,2-25,8         |
| 3.    | Расход МПК, г/мин       | 23-33             |

## Выводы по главе 2

1) Содержательное описание процесса ПЛВ и проведение литературного обзора позволили выявить основные технологические параметры процесса, которые оказывают влияние на качество наплавленного валика и материала в целом. Было установлено, что на геометрические параметры наплавочных валиков,

такие как глубина проплавления, ширина и высота валика главное влияние оказывает мощность лазерного излучения, скорость наплавки и расход МПК.

2) Разработана математическая модель взаимодействия лазерного излучения и металлопорошковой композиции для процесса прямого лазерного выращивания, позволяющая установить зависимости между технологическими параметрами выращивания, отличающаяся от известных решений учётом полноты плавления металлопорошковой композиции вне зоны ванны расплава. Полученные результаты позволяют уточнить границы рациональной области технологических режимов прямого лазерного выращивания для последующего поиска рациональных значений методом регрессионного анализа.

3) Проведено численное моделирование процесса взаимодействия лазерного излучения и МПК в процессе ПЛВ жаропрочного сплава на никелевой основе ЭП648, позволившее определить влияние скорости газопорошковой струи, мощности лазера, насыпной плотности, гранулометрического состава частиц на размеры формируемого объёма наплавленного металла. Установлено, что увеличение скорости газопорошковой струи МПК с 3,0 до 4,5 м/с приводит к увеличению расстояния до зоны расплавления с 2,23 до 10,1 мм, а также увеличению объемного расхода МПК с 6,25 до 24,97 мм<sup>3</sup>/с и, как следствие, ширины наплавочного валика с 2,51 до 2,71 мм. Увеличение мощности лазера от 1600 до 2000 Вт приводит к уменьшению расстояния, необходимого для расплавления частиц МПК, с 7,12 до 4,81 мм, при этом объемный расход и ширина валика остаются постоянными, и не зависят от мощности лазерного излучения. С ростом значений насыпной плотности МПК увеличиваются как расстояние до зоны расплавления МПК с 4,22 до 4,80 мм, так и объемный расход с 5,01 до 19,99 мм<sup>3</sup>/с, и ширина валика с 2,3 до 2,7 мм. С увеличением радиуса частиц МПК с 75 до 125 мкм увеличивается расстояние до зоны расплавления МПК, с 2,78 до 7,07 мм, объемный расход МПК с 3,7 до 29,6 мм<sup>3</sup>/с и ширина наплавочного валика изменяется от 2,1 до 2,71 мм.

4) На основании созданной математической модели и проведённого численного моделирования определены диапазоны рациональных

технологических параметров процесса ПЛВ заготовок из МПК жаропрочного никелевого сплава ЭП648, обеспечивающие заданный комплекс физико-механических и химических свойств для выращенного материала: мощность лазерного излучения, 1800-2000 Вт; расход МПК, 20-31 г/мин; скорость 20-30 мм/с.

### ГЛАВА 3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНОГО РЕЖИМА ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА ЭП648 И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕГО ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

#### **3.1 Оборудование и методика, используемые для проведения экспериментов**

Изготовление образцов для исследования структуры и механических свойств жаропрочного сплава ЭП648 (ХН50ВМТЮБ) производилось с использованием аддитивной установки ПЛВ ИЛИСТ-L.

Гранулометрический анализ МПК определяли с использованием программного обеспечения Image Expert на оптическом металлографическом микроскопе МЕТАМ ЛВ-32 со встроенной телевизионной камерой по ГОСТ 23402. Форму частиц определяли по ГОСТ 25849. Определение сыпучести порошка было проведено с помощью калиброванной воронки (прибор Холла) в соответствии с ГОСТ 20899. Насыпная плотность была определена с использованием воронки в соответствии с ГОСТ 19440. Для анализа морфологии частиц порошкового материала, а также оценки химического состава МПК и опытных образцов был использован аналитический сканирующий электронный микроскоп Tescan Vega по ГОСТ Р ИСО 22309, ГОСТ 24018.7, ГОСТ 24018.8.

Исследования механических свойств, изготовленных по технологии ПЛВ образцов, проводились на универсальной испытательной машине модели INSTRON 8802 по ГОСТ 1497, испытания проводились со скоростью деформации 1 мм/мин. Исследование шероховатости поверхности синтезированных образцов проводилось на профилографе-профилометре Hommel Tester W55 согласно ГОСТ 2789. Исследование твердости образцов – по Бринеллю ГОСТ 9012 с использованием стационарного твердомера ТШ-2М.

Макроструктуру образцов исследовали с помощью металлографического инвертированного микроскопа МЕТАМ ЛВ-32. Все образцы были промаркированы и предварительно отшлифованы и отполированы. Подготовку шлифов осуществляли на шлифовально-полировальном станке Metkon GRIPO IV. Для выявления макроструктуры образцов проводили их травление в реактиве 100

мл HCl, 5 мл H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 20 гр CuSO<sub>4</sub> • 5H<sub>2</sub>O, 80 мл H<sub>2</sub>O при комнатной температуре в течение 4-5 минут. Для выявления микроструктуры на образцах проводили химическое травление в растворе: 10 мл HNO<sub>3</sub>, 20 мл HCl, 25 мл H<sub>2</sub>O и 10 мл H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> при комнатной температуре в течение 2-3 минут или электролитическим способом при комнатной температуре в течение 60...90 секунд в электролите: 10 г лимонной кислоты + 10 г хлористого аммония + 1 л воды.

Статистический анализ результатов экспериментов, проводился с использованием программного продукта STATISTICA. Дробно-факторный эксперимент является методом статистического проектирования эксперимента, который позволяет проводить эксперименты с минимальными объёмами выборок и с использованием наименьшего количества ресурсов и времени. Для анализа в данной работе будем использовать статистический метод Тагучи, который является одним из эффективных подходов к планированию и проведению дробных факторных экспериментов, предназначенных для улучшения процессов производства и повышения качества продукции. Этот метод структурированно руководит исследованием влияния основных и взаимодействующих факторов с использованием ограниченного числа экспериментальных точек.

### **3.2 Исследование технологических свойств МПК высоколегированного жаропрочного сплава на никелевой основе ЭП648**

При выращивании крупногабаритных заготовок деталей авиационных ГТД основным направлением оптимизации является повышение производительности процесса ПЛВ и, как следствие, сокращение времени выращивания. Производительность процесса ПЛВ определяется массовым расходом порошка, шагом слоя, диаметром пятна лазерного излучения. Основное влияние на производительность оказывает скорость процесса ПЛВ. В то же время, с изменением скорости процесса происходит изменение скорости охлаждения выращиваемой заготовки, что приводит к протеканию неравновесных превращений и к стабилизации метастабильных фаз. Причиной образования трещин в заготовках из жаропрочного материала на основе никеля,

изготавливаемых по технологии ПЛВ, является образование нежелательных фаз и карбидов, вызванных термомеханическими явлениями во время охлаждения ванны расплава. Форма и размер наплавочного валика напрямую зависит от используемых технологических параметров процесса ПЛВ. Стоит отметить, что область рациональных технологических параметров процесса ПЛВ для сплава ЭП648, при которой формируются без дефектные валики нужной формы и геометрических размеров, очень узкая. Кроме этого, для каждого материала и гранулометрического состава МПК область рациональных технологических параметров строго индивидуальна.

Определение рациональных технологических параметров процесса ПЛВ возможно экспериментально, посредством проведения экспериментов и изготовления большого количества образцов для последующего исследования макро- микроструктуры и механических свойств. Из-за большого количества управляемых параметров в процессе ПЛВ, потребуется значительное количество времени и материальных ресурсов для определения рациональных значений процесса ПЛВ. В случае ошибки, неправильно подобранные рациональные параметры процесса ПЛВ приведет к неудовлетворительным механическим свойствам материала и соответственно к проведению дополнительных исследований. Из этого можно сделать следующий вывод, что подбор рациональных технологических параметров процесса ПЛВ экспериментальным путем является трудоёмкой задачей.

Для того, чтобы исключить влияние на свойства изготавливаемой детали дефектов структуры исходной МПК исследовали физические и химические свойства МПК используемую в процессе ПЛВ. Из литературных источников, (глава 1), известно, что на механические характеристики заготовок получаемых методом ПЛВ, негативное влияние оказывает образование непроплавов и трещин в материале. В связи с этим, был проведен подбор рациональных технологических параметров режима ПЛВ для жаропрочного сплава ЭП648. В задачу которого входит поиск методов стабилизации температуры в процессе ПЛВ так, чтобы



обеспечить скорость охлаждения, при которой в сплаве будет происходить формирование равновесных фаз и структур.

Для исключения влияния качества МПК на образование дефектов в процессе ПЛВ, были проведены исследования, зависимости качества получаемых образцов в процессе ПЛВ от физических и химических свойств исходной МПК, а также влияние изменения технологических параметров процесса ПЛВ на образование трещин. Использование жаропрочного сплава ЭП648 (ХН50ВМТЮБ) для изготовления крупногабаритных заготовок деталей «Кожух наружный камеры сгорания» и «Кожух внутренний камеры сгорания» ГТД задано конструктором. Результаты исследования химического состава МПК жаропрочного сплава ЭП648 представлены в таблицах 3.1-3.2. Химический состав МПК сплава ЭП648 соответствует требованиям изготовителя АО «Опытный завод «Микрон» по ТУ 14-1-1072-74. Технология получения МПК – плазменное распыление металла в непрерывно контролируемой среде инертных газов. МПК разделяется на фракции методом сухого рассева и упаковывается в среде защитного газа, что позволяет сохранить свойства МПК в течение всего периода хранения.

Таблица 3.1 – Химический анализ МПК жаропрочного сплава на никелевой основе ЭП648

| Химические элементы     | Mn   | Cr        | Si   | Ni     | Fe   | Al      | B      | Ti      | Mo      | Nb      | Ce    |
|-------------------------|------|-----------|------|--------|------|---------|--------|---------|---------|---------|-------|
| Полученные значения, %  | 0,17 | 32,22     | 0,00 | 58,26  | 0,21 | 0,65    | 0,00   | 0,89    | 2,67    | 0,65    | 0,02  |
| Нормативные значения, % | ≤0,5 | 32,0-35,0 | ≤0,4 | Основа | ≤4   | 0,5-1,1 | ≤0,008 | 0,5-1,1 | 2,3-3,3 | 0,5-1,1 | ≤0,03 |

Таблица 3.2 – Химические элементы МПК ЭП648, рассчитанные с использованием методик аналитической химии

| Химические элементы     | C      | S     | P      | W       |
|-------------------------|--------|-------|--------|---------|
| Полученные значения, %  | 0,0095 | 0,004 | 0,0039 | 4,60    |
| Нормативные значения, % | ≤0,1   | ≤0,01 | ≤0,015 | 4,3-5,3 |

Выбор технологических параметров процесса ПЛВ для жаропрочного сплава ЭП648 и качество получаемого материала зависят от качества и параметров исходной МПК. С целью исключения негативного влияния МПК были проведены исследования морфологии частиц МПК жаропрочного никелевого сплава ЭП648

(ХН50ВМТЮБ) с использованием сканирующего электронного микроскопа Tescan Vega и гранулометрического состава частиц МПК с помощью металлографического микроскопа и системы обработки оптических изображений Image Expert Pro 3.0. Определение размеров частиц проведено в соответствии с ГОСТ 23402, определение формы частиц проведено в соответствии с ГОСТ 25849, описание дефектов в соответствии с ГОСТ Р 58418. Результаты микроскопического анализа МПК представлены в таблице 3.3

Таблица 3.3 – Результаты микроскопического анализа МПК ЭП648 производства АО «Опытный завод «Микрон»

| Параметр            | Фактические значения |
|---------------------|----------------------|
| Фракция, мкм        | 63-200               |
| 10%                 | 107                  |
| 50%                 | 126                  |
| 90%                 | 188                  |
| Форма частиц        | сферическая          |
| Дефекты поверхности | не обнаружены        |
| Поры                | не обнаружены        |

Также размер частиц исследуемой МПК определялся посредством метода сухого просеивания в соответствии с ГОСТ 18318 на сетках по ГОСТ 6613. Для просеивания применялся виброгрохот «Вибротехник С20/50» с комплектом сит от 40 до 200 мкм и шагом ячеек 20 мкм. Результаты представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Размер частиц МПК ЭП648 определенные методом сухого просеивания

| Основная фракция, мкм | Отклонения от основной фракции, % |                     |
|-----------------------|-----------------------------------|---------------------|
|                       | Плюсовая (>200 мкм)               | Минусовая (<63 мкм) |
| 63-200                | 2,5                               | Отсутствует         |

Микрофотография исходной МПК жаропрочного сплава ЭП648 представлена на рисунке 3.1. Поверхность порошинок МПК имеет выраженную дендритную структуру, типичную для технологии ее изготовления, основанной на использовании метода плазменного распыления металла в непрерывно контролируемой среде инертных газов.

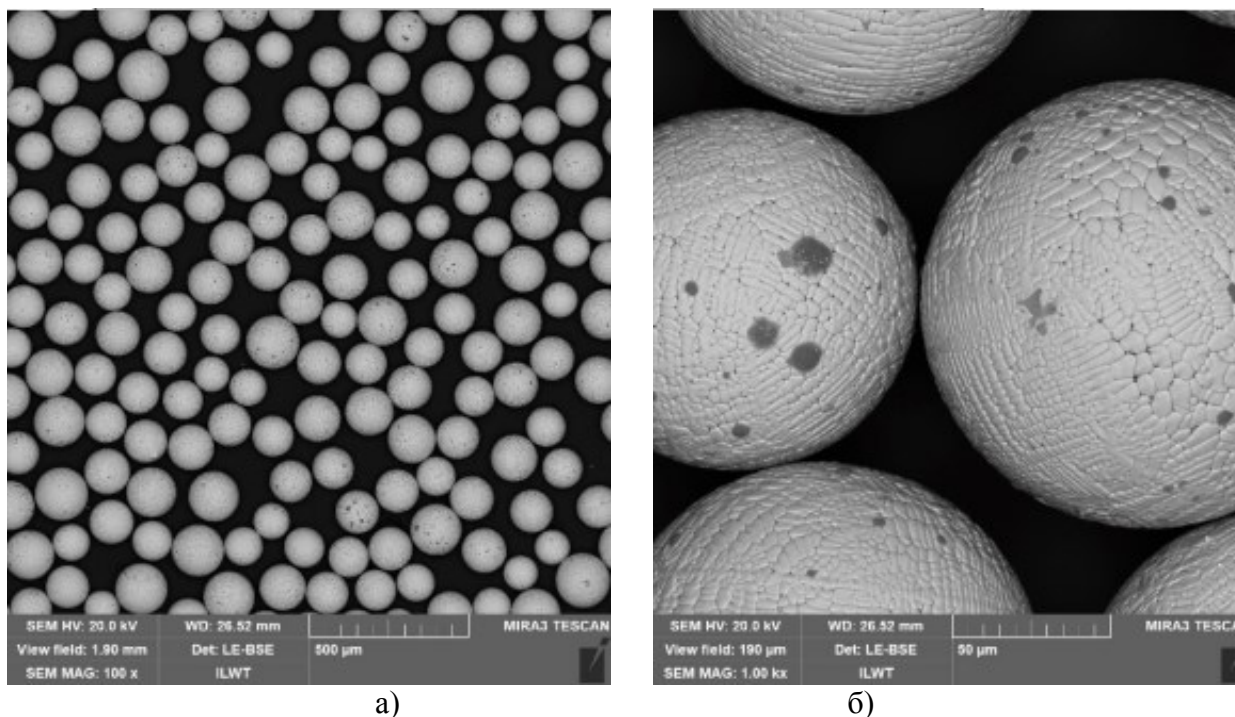


Рисунок 3.1 – Микрофотография исходного порошка жаропрочного сплава на никелевой основе ЭП648 (ХН50ВМТЮБ) а)  $\times 500$  мкм; б)  $\times 50$  мкм

Частицы порошка в основном имеют правильную сферическую форму, результаты исследования приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Форма частиц МПК ЭП648 (ХН50ВМТЮБ) по ГОСТ 25849

| Фактическое содержание частиц типовой формы, %   |             |              |
|--------------------------------------------------|-------------|--------------|
| Сферическая, %                                   | Округлая, % | Угловатая, % |
| 97                                               | 3           | —            |
| Содержание частиц типовой формы по ГОСТ 25849, % |             |              |
| 73,5                                             | 22,6        | 3,9          |

На основании анализа было установлено, что частицы МПК имеют сферическую форму, при этом во всех частицах наблюдается равномерное распределение фазовых составляющих, поры в микроструктуре и на поверхности отсутствуют. Текущность МПК ЭП648 (ХН50ВМТЮБ) составляет 16,4 с, насыпная плотность 4,9 г/см<sup>3</sup>.

Проведенное исследование гранулометрического состава МПК сплава ЭП648 показало, что распределение частиц по размерам находится в диапазоне 63 до 210 мкм, основная фракция частиц МПК ЭП648 по численному распределению

лежит в пределах 140...200 мкм что составляет 74,76% (рисунок 3.2). Разделение частиц МПК по поверхностному (рисунок 3.3) и объёмному распределению (рисунок 3.4) показывает, что основную массу составляют частицы в диапазоне от 140 до 200 мкм, что составляет 79,2% и 81,5% соответственно. Дифференциальные кривые численного, поверхностного и массового распределения частиц МПК ЭП648 по размерам представлено на рисунке 3.5. Результаты исследования гранулометрического состава МПК ЭП648 отражены в таблице 3.6.

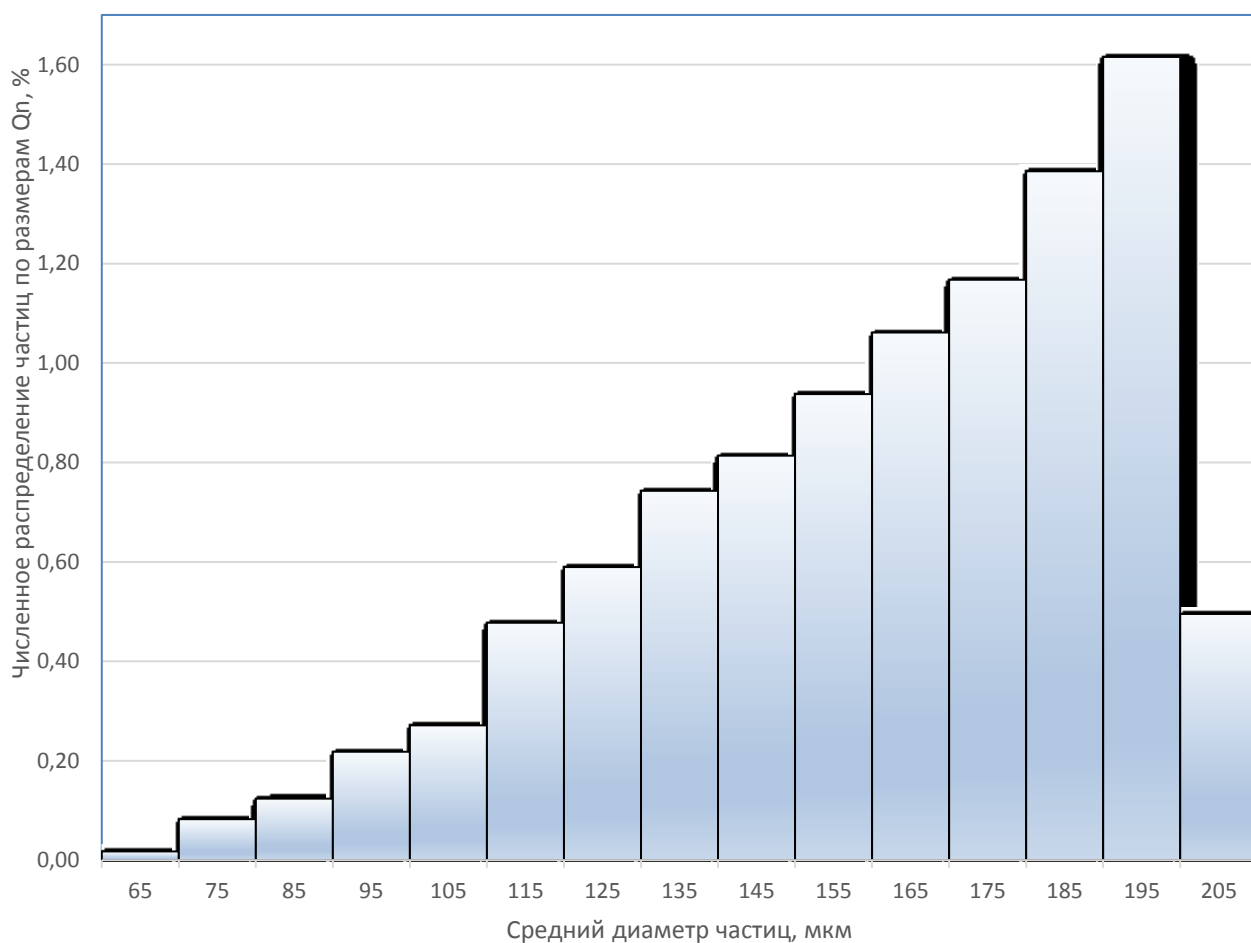


Рисунок 3.2 – Гистограмма численного распределения частиц МПК ЭП648 по размерам

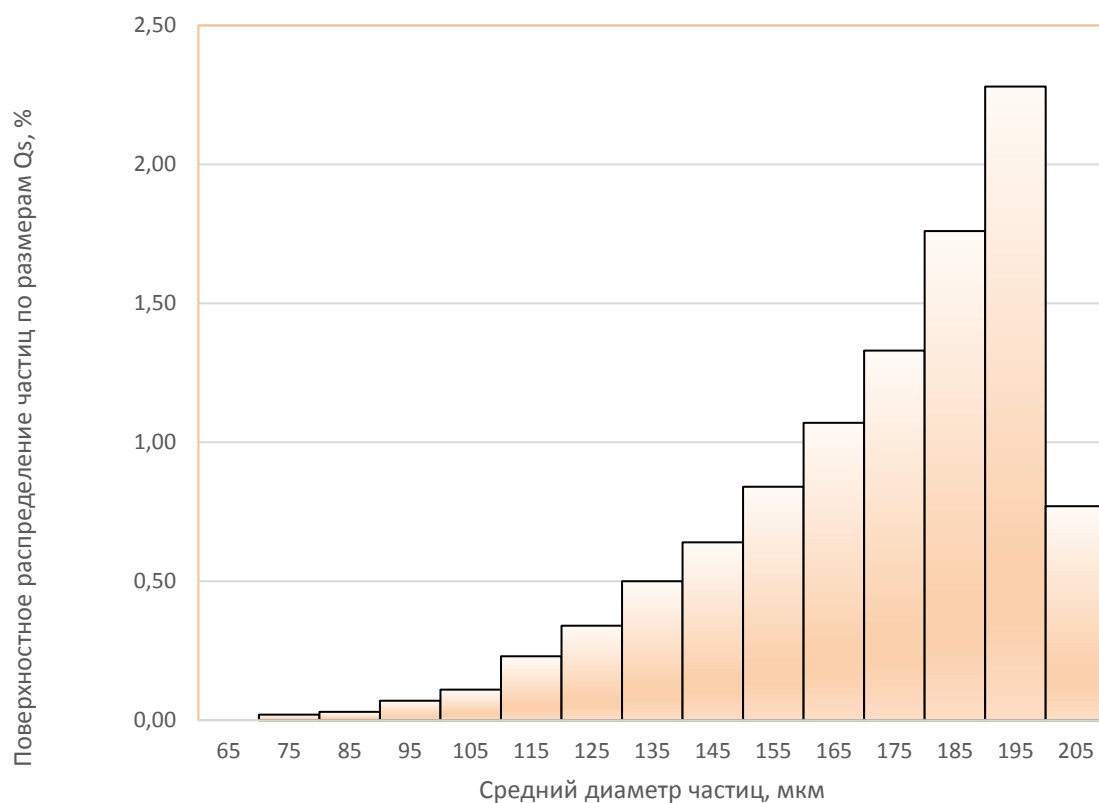


Рисунок 3.3 – Гистограмма поверхностного распределения частиц МПК ЭП648 по размерам

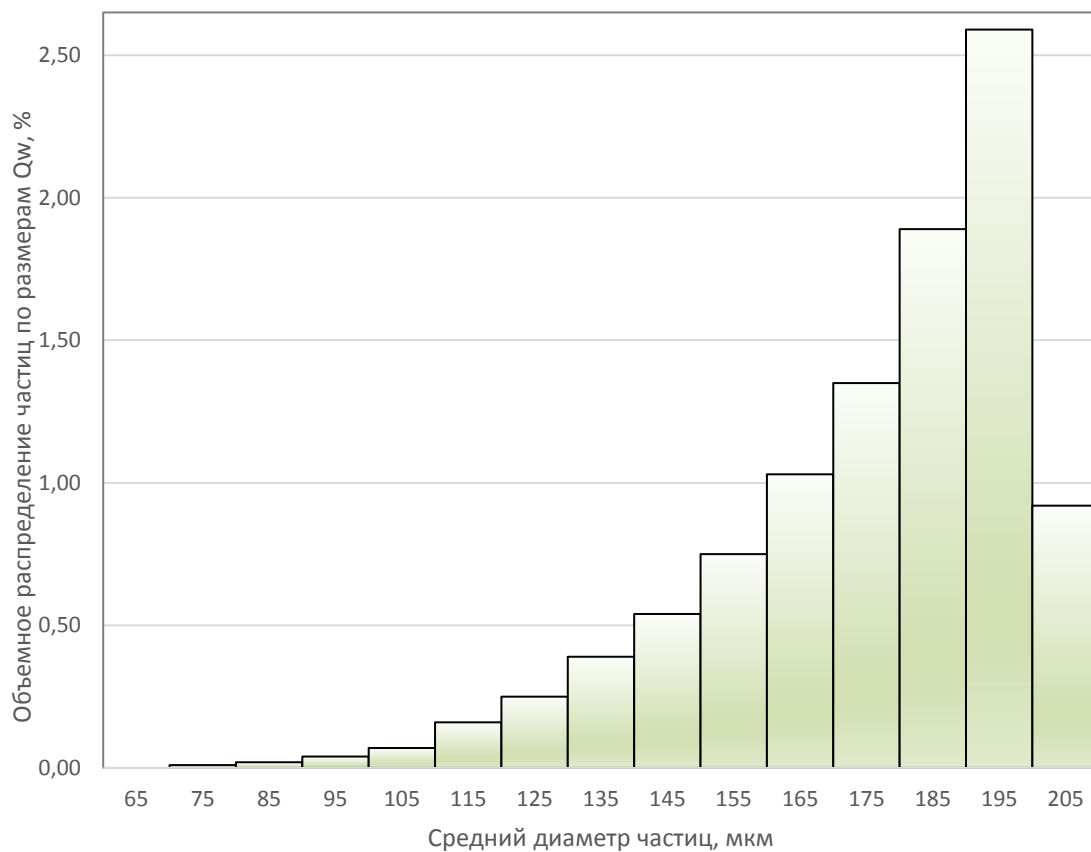


Рисунок 3.4 – Гистограмма объёмного распределения частиц МПК ЭП648 по размерам

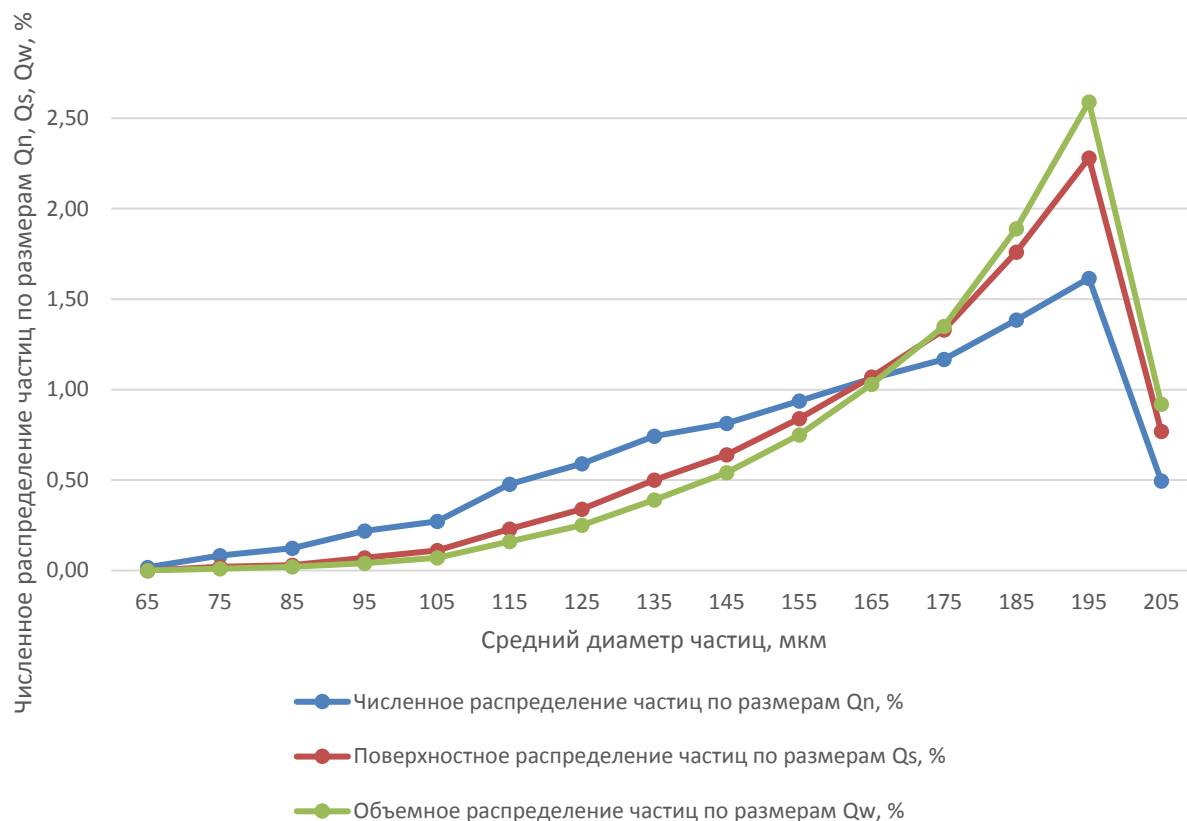


Рисунок 3.5 – Дифференциальные кривые численного, поверхностного и объемного распределения частиц МПК ЭП648 по размерам

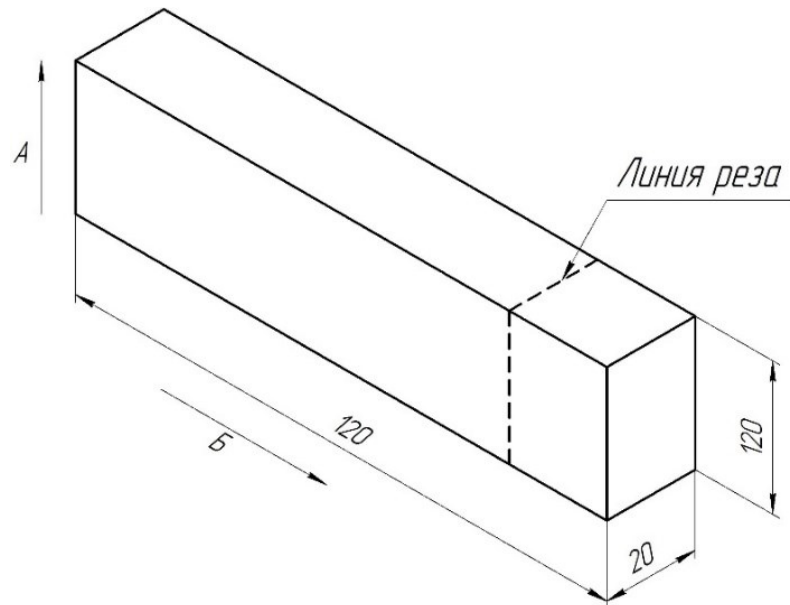
Таблица 3.6 – Численное, поверхностное и объемное распределение частиц МПК сплава ЭП648 в состоянии поставки

| № п/п | Интервал диаметров, мкм | Средний диаметр частиц фракции, мкм | Численное распределение частиц по размерам Qn, % | Поверхностное распределение частиц по размерам Qs, % | Объемное распределение частиц по размерам Qw, % |
|-------|-------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 1.    | 60-70                   | 65,00                               | 0,02                                             | 0,00                                                 | 0,00                                            |
| 2.    | 70-80                   | 75,00                               | 0,08                                             | 0,02                                                 | 0,01                                            |
| 3.    | 80-90                   | 85,00                               | 0,12                                             | 0,03                                                 | 0,02                                            |
| 4.    | 90-100                  | 95,00                               | 0,22                                             | 0,07                                                 | 0,04                                            |
| 5.    | 100-110                 | 105,00                              | 0,27                                             | 0,11                                                 | 0,07                                            |
| 6.    | 110-120                 | 115,00                              | 0,48                                             | 0,23                                                 | 0,16                                            |
| 7.    | 120-130                 | 125,00                              | 0,59                                             | 0,34                                                 | 0,25                                            |
| 8.    | 130-140                 | 135,00                              | 0,74                                             | 0,50                                                 | 0,39                                            |
| 9.    | 140-150                 | 145,00                              | 0,81                                             | 0,64                                                 | 0,54                                            |
| 10.   | 150-160                 | 155,00                              | 0,94                                             | 0,84                                                 | 0,75                                            |
| 11.   | 160-170                 | 165,00                              | 1,06                                             | 1,07                                                 | 1,03                                            |
| 12.   | 170-180                 | 175,00                              | 1,17                                             | 1,33                                                 | 1,35                                            |
| 13.   | 180-190                 | 185,00                              | 1,39                                             | 1,76                                                 | 1,89                                            |
| 14.   | 190-200                 | 195,00                              | 1,62                                             | 2,28                                                 | 2,59                                            |
| 15.   | 200-210                 | 205,00                              | 0,50                                             | 0,77                                                 | 0,92                                            |

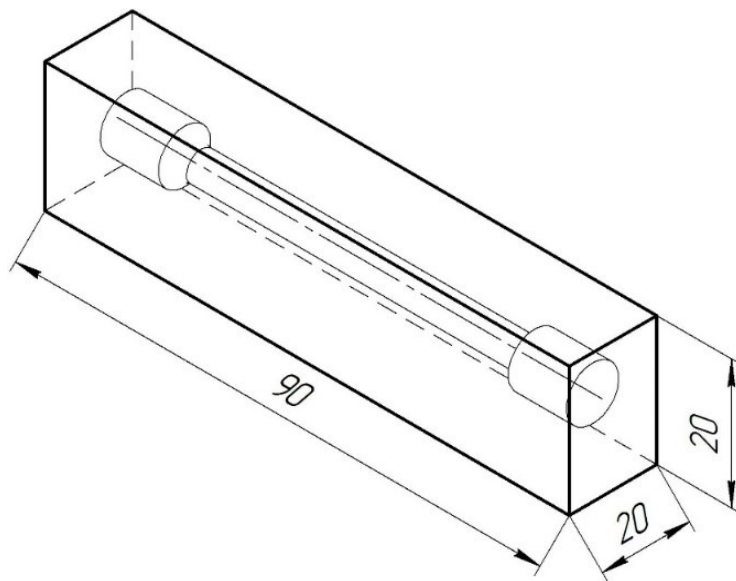
Результаты исследования гранулометрического состава МПК никелевого сплава ЭП648 и литературного обзора позволили структурировать основные технологические параметры процесса ПЛВ, определить регулируемые и нерегулируемые технологические параметры процесса ПЛВ, что позволило сделать предположение, что качество материала получаемого с помощью процесса ПЛВ определяется использованием рациональных технологических параметров ПЛВ. Следовательно, важнейшим этапом разработки технологического процесса получения заготовок деталей авиационных ГТД методом ПЛВ, определяющим механические свойства и бездефектность (отсутствие трещин) изготавливаемого материала, является определение рациональных технологических параметров процесса ПЛВ. Определение рационального режима сократит объём экспериментальных исследований для достижения требуемых механических и других эксплуатационных свойств материала.

### **3.3 Определение рациональных технологических параметров выращивания жаропрочного сплава ЭП648**

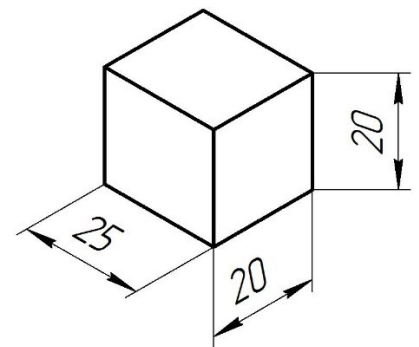
Для определения рационального режима ПЛВ исследуемого жаропрочного сплава ЭП648, были изготовлены образцы согласно ГОСТ Р 57556 с размерами: 120x20x120 мм, схематичное изображение образца представлено на рисунке 3.6а. Изготовление образцов осуществлялось с изменением направления выращивания каждого слоя на 180°, схема выращивания образцов представлена на рисунке 3.7. Изготовление образцов было осуществлено на платформе построения из материала Ст3, с размерами 60x160x30 мм. Количество образцов 5 на каждый режим. Далее образцы отделялись от платформы построения и отрезались заготовки с размерами 90x20x20 мм (рисунок 3.6б) и 25x20x20 мм (рисунок 3.6в). При изготовлении образцов резку проводили с использованием смазывающе-охлаждающей жидкости во избежание перегрева и прижогов материала. Для контроля механических свойств изготавливалось по 5 образцов, в долевым и поперечном направлении относительно направления выращивания, по ГОСТ 1497 (тип III, номер образца 7) для каждого режима.



А и Б направление выращивания образца  
а)



б)



в)

Рисунок 3.6 – Форма и размеры образцов:  
а) полученного в результате ПЛВ, б) для исследования механических свойств,  
в) для структурных исследований



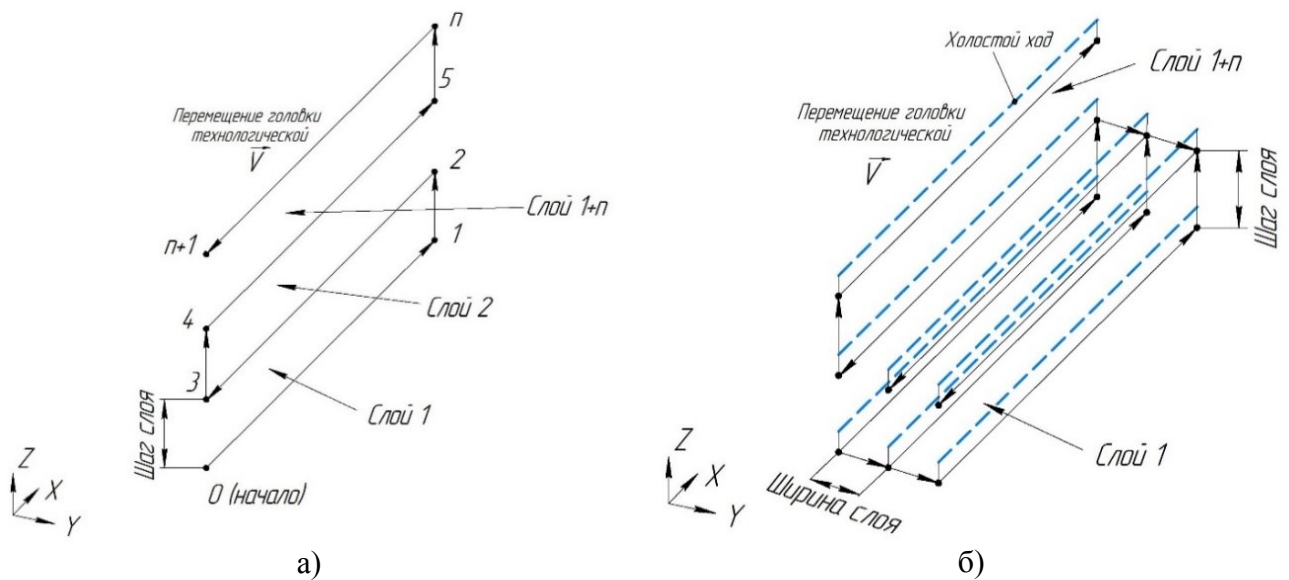


Рисунок 3.7 – Схема перемещения технологической головки при наплавке:  
а – при наплавке единичной стенки; б – при получении объемной заголовки

Для определения рационального значения технологических параметров процесса ПЛВ жаропрочного сплава ЭП648, из диапазона рациональных значений технологических параметров, определенных в главе 2 и представленных в таблице 2.19, провели эксперимент с целью подтверждения и уточнения значений. Исследование влияния технологических параметров выращивания на механические свойства синтезируемого материала осуществлялось в соответствии с моделью дробно-факторного эксперимента по методу Тагучи. В качестве варьируемых параметров были выбраны: мощность лазерного излучения  $Q_{\text{лазера}}$ , Вт (X1), скорость движения технологической головки выращивания  $v$ , мм/с (X2), расход порошка  $G$ , г/мин (X3) и технологическая пауза  $T$ , с (X4). В качестве зависимой переменной была объемная плотность энергии  $VED$ , Дж/мм<sup>3</sup> (Y1) и предел прочности на растяжение  $\sigma_b$ , МПа (Y2). В таблице 3.7 представлены значения факторов в натуральном масштабе ортогонального плана эксперимента L16 для 4-х факторов по Тагучи. После проведения исследований макро и микроструктуры и определения механических свойств образцов до и после термообработки, полученных по режимам, представленным в таблице 3.7, проводили дополнительные исследования с целью уточнения мощности лазерного излучения. В таблице 3.8 представлены значения факторов в натуральном масштабе ортогонального плана эксперимента L9 для 4-х факторов по Тагучи.

Таблица 3.7 – Режимы выращивания образцов

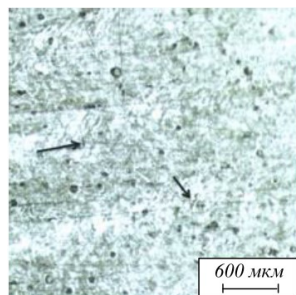
| № Опыта                                                                                                                                               | Мощность лазерного излучения $Q_{\text{лазер}}$ , Вт (X1) | Скорость выращивания $v$ , мм/с (X2) | Расход порошка $G$ , г/мин (X3) | Технологическая пауза $T$ , с (X4) |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| 1                                                                                                                                                     | 1200                                                      | 20                                   | 20,50                           | 30                                 |
| 2                                                                                                                                                     | 1400                                                      | 20                                   | 23,90                           | 37                                 |
| 3                                                                                                                                                     | 1600                                                      | 20                                   | 27,30                           | 43                                 |
| 4                                                                                                                                                     | 1800                                                      | 20                                   | 30,70                           | 50                                 |
| 5                                                                                                                                                     | 1200                                                      | 23                                   | 23,90                           | 43                                 |
| 6                                                                                                                                                     | 1400                                                      | 23                                   | 20,50                           | 50                                 |
| 7                                                                                                                                                     | 1600                                                      | 23                                   | 30,70                           | 30                                 |
| 8                                                                                                                                                     | 1800                                                      | 23                                   | 27,30                           | 37                                 |
| 9                                                                                                                                                     | 1200                                                      | 27                                   | 27,30                           | 50                                 |
| 10                                                                                                                                                    | 1400                                                      | 27                                   | 30,70                           | 43                                 |
| 11                                                                                                                                                    | 1600                                                      | 27                                   | 20,50                           | 37                                 |
| 12                                                                                                                                                    | 1800                                                      | 27                                   | 23,90                           | 30                                 |
| 13                                                                                                                                                    | 1200                                                      | 30                                   | 30,70                           | 37                                 |
| 14                                                                                                                                                    | 1400                                                      | 30                                   | 27,30                           | 30                                 |
| 15                                                                                                                                                    | 1600                                                      | 30                                   | 23,90                           | 50                                 |
| 16                                                                                                                                                    | 1800                                                      | 30                                   | 20,50                           | 43                                 |
| диаметр пятна лазера, 2,5 мм; расход защитного газа в сопле $C_z$ – 15 л/мин;<br>расход транспортирующего газа $C_m$ – 5 л/мин; шаг слоя $z$ – 0,8 мм |                                                           |                                      |                                 |                                    |

Таблица 3.8 – Режимы выращивания образцов

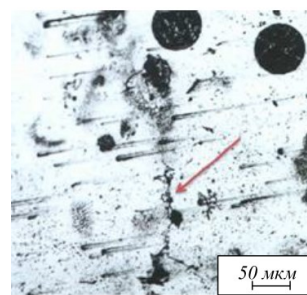
| № Опыта                                                                                                                                               | Мощность лазерного излучения $Q_{\text{лазер}}$ , Вт (X1) | Скорость выращивания $v$ , мм/с (X2) | Расход порошка $G$ , г/мин (X3) | Технологическая пауза $T$ , с (X4) |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| 1                                                                                                                                                     | 1800                                                      | 23,00                                | 23,0                            | 36                                 |
| 2                                                                                                                                                     | 2000                                                      | 23,00                                | 25,6                            | 40                                 |
| 3                                                                                                                                                     | 2200                                                      | 23,00                                | 28,2                            | 44                                 |
| 4                                                                                                                                                     | 1800                                                      | 25,50                                | 25,6                            | 44                                 |
| 5                                                                                                                                                     | 2000                                                      | 25,50                                | 28,2                            | 36                                 |
| 6                                                                                                                                                     | 2200                                                      | 25,50                                | 23,0                            | 40                                 |
| 7                                                                                                                                                     | 1800                                                      | 28,00                                | 28,2                            | 40                                 |
| 8                                                                                                                                                     | 2000                                                      | 28,00                                | 23,0                            | 44                                 |
| 9                                                                                                                                                     | 2200                                                      | 28,00                                | 25,6                            | 36                                 |
| диаметр пятна лазера, 2,5 мм; расход защитного газа в сопле $C_z$ – 15 л/мин;<br>расход транспортирующего газа $C_m$ – 5 л/мин; шаг слоя $z$ – 0,8 мм |                                                           |                                      |                                 |                                    |

Дефекты макро- и микроструктуры, такие как пористость, непроплавы, нерасплавленные частички МПК и трещины оценивали в доленом и поперечном направлениях относительно направления выращивания образцов в процессе ПЛВ из одного образца для каждого режима в состоянии до и после термообработки.

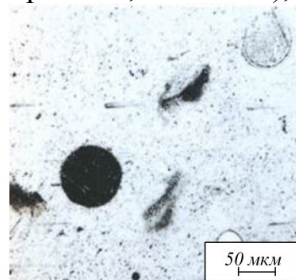
Макроанализ проводился на долевых темплатах, изготовленных по всей высоте образцов и на поперечных темплатах, изготовленных по среднему сечению относительно высоты образцов со стороны левого бокового торца. Микроанализ проводился на шлифах, изготовленных со стороны верхнего торца образцов. Результаты макро- и микроанализа для режимов из таблицы 3.7 и таблицы 3.8 представлены на рисунке 3.8. Термообработку проводили по следующему режиму: 1) закалка на воздухе с температуры  $1180 \pm 10^\circ\text{C}$  с выдержкой в течение 4 часов; 2) отжиг при  $900 \pm 10^\circ\text{C}$  с выдержкой в течение 16 часов. Указанный режим рекомендован для жаропрочного сплава ЭП648 (ВХ4А) и его литейной модификации ВХ4Л [162, 163].



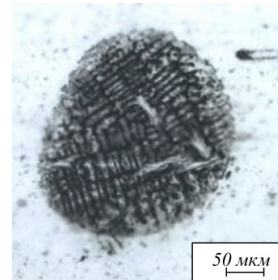
Макроструктура 1200 Вт  
(поперечный, после ТО), x20



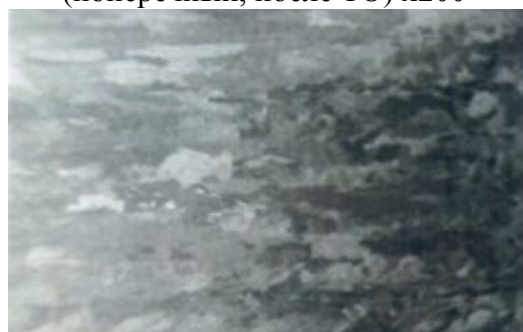
Микроструктура 1200 Вт  
(поперечный, после ТО) x200



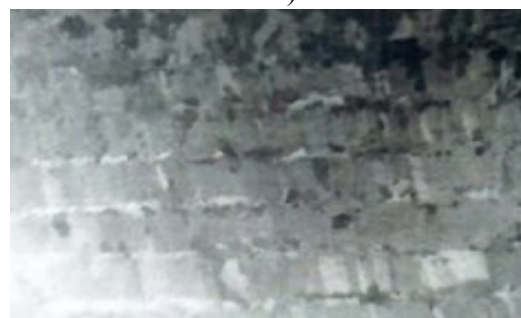
Микроструктура 1200 Вт  
(поперечный, после ТО) x200



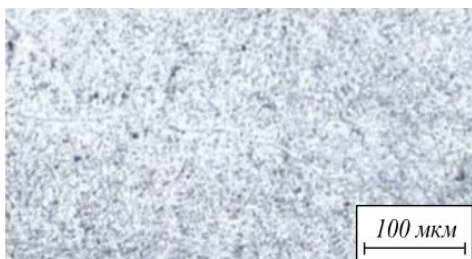
Микроструктура 1200 Вт (поперечный,  
после ТО) x500



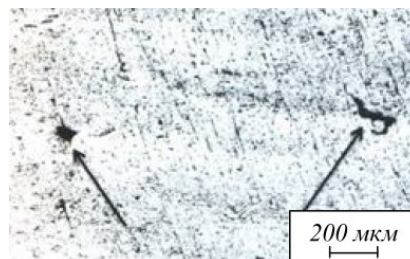
Макроструктура 1400 Вт  
(долевое направление, без ТО) x1



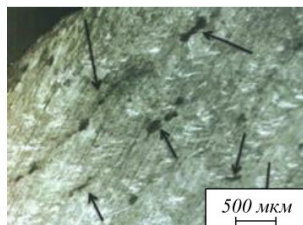
Макроструктура 1400 Вт (поперечный,  
без ТО) x1



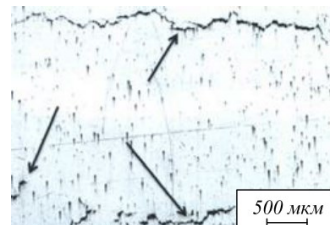
Микроструктура 1400 Вт  
(долевое направление, после ТО)  
x200



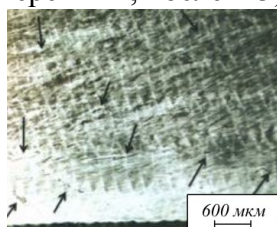
Микроструктура 1400 Вт (поперечный,  
после ТО) x50



Макроструктура 1600 Вт  
(поперечный, после ТО) x3



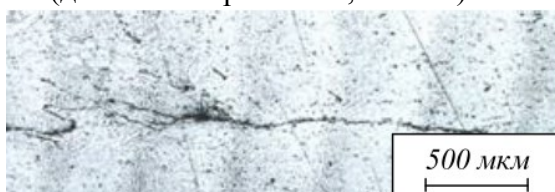
Микроструктура 1600 Вт (поперечный,  
после ТО) x40



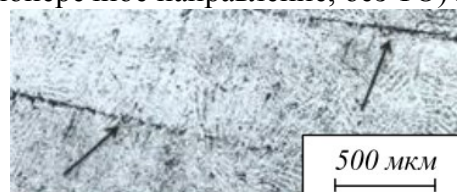
Макроструктура 1800 Вт  
(долевое направление, без ТО) x1



Макроструктура 1800 Вт  
(поперечное направление, без ТО) x1



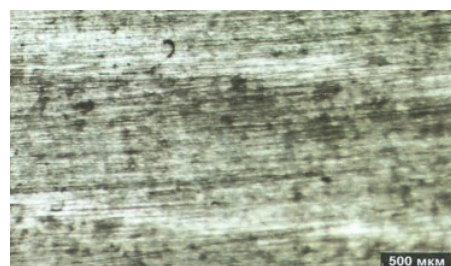
Микроструктура 1800 Вт  
(поперечное направление, после ТО)  
x40



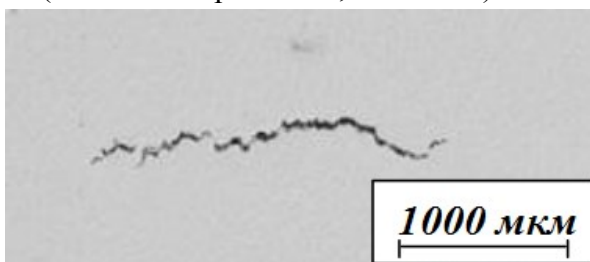
Микроструктура 1800 Вт (поперечное  
направление, после ТО) x100



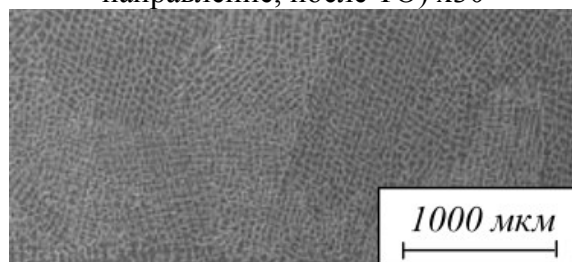
Макроструктура 2000 Вт  
(долевое направление, после ТО) x20



Макроструктура 2000 Вт (поперечное  
направление, после ТО) x30

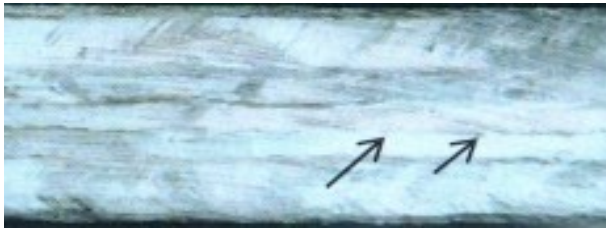


Микроструктура 2000 Вт поперечное  
направление, после ТО) x1000

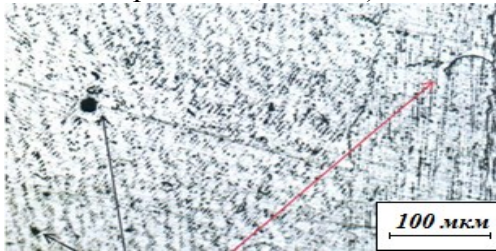


Микроструктура 2000 Вт (поперечное  
направление, после ТО) x1000

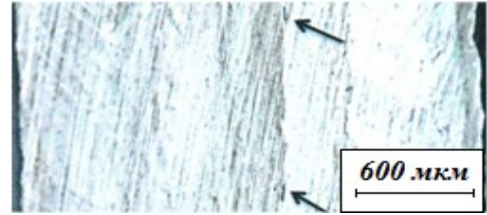




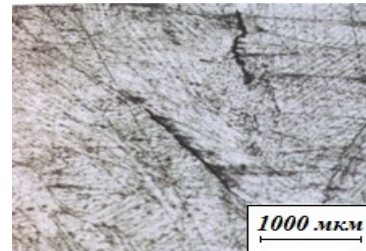
Макроструктура 2200 Вт (долевое направление, без ТО) x1



Микроструктура 2200 Вт (поперечное направление, без ТО) x100



Макроструктура 2200 Вт (долевое направление, без ТО) x8



Микроструктура 2200 Вт (долевое направление, после ТО) x1000

Рисунок 3.8 – Изменения макро и микроструктуры образцов при различной мощности лазера, до и после термической обработки

Как видно на рисунке 3.8, доли площади микроструктуры, занятой дефектами, были относительно низкими для всех режимов выращивания, что привело к плотности материала выше 99,5%. В макроструктуре на всех образцах наблюдаются выраженные границы слоев сплавления при ПЛВ. Большинство дефектов (см. рисунок 3.8) представляли собой трещины и поры, которые являются типичными дефектами технологии ПЛВ. Одной из причин появления трещин является остаточные напряжения в материале и присутствие в сплавах карбидов. Причинами появления пор в выращенном материале обычно являются: локализованное испарение легирующих элементов, пористость исходного сырья или захват защитного газа [164, 165, 166]. Нерасплавленные частички МПК появляются при низкой мощности лазерного излучения, т.е. из-за малой объемной плотности энергии, подведенной к МПК, недостаточной для полного расплавления частичек порошкового материала. Нерасплавленные частички МПК отсутствовали в образцах, пока мощность лазера не была увеличена до 1600 Вт. Изменения макро- и микроструктуры образцов при различной мощности лазера, а также до и после термической обработки были зафиксированы и исследованы. Результаты микроанализа представлены на рисунке 3.8. При микроанализе установлено, что на всех образцах не наблюдается трековой

структуры. Микроструктура представляет собой зерна  $\gamma$ -твердого раствора и упрочняющие фазы. Макро- и микроструктура исследовалась для каждого значения мощности лазера и режима термообработки, в работе приведены только те, которые наиболее показательно иллюстрируют характерные дефекты или их отсутствие.

После термообработки в макроструктуре образца наблюдаются слабо просматриваемые границы сплавления треков. Анализ микроструктуры показывает, что в образцах после термообработки формируется разнотернистость, утрачивается слоистая структура, характерная для наплавленных частиц, наблюдаются структуры, характерные для упорядоченных твёрдых растворов на основе никеля – видно чередование фаз пластинчатой формы.

В материале всех образцов обнаружены дефекты, такие как единичные поры, нерасплавленные частицы МПК, непроплавы и трещины. В материале образцов, выращенных при мощности лазерного излучения 1200 Вт, обнаружены множественные нерасплавленные частицы порошка размером до 0,2 мм и единичные трещины длиной до 0,7 мм. В образцах, выращенных по режиму 2 (таблица 3.7) при мощности 1400 Вт, – поры до 0,3 мм, непроплавы – до 0,09х0,25 мм, трещины – до 3,0 мм. В образцах, выращенных при мощности 1600 Вт, – поры до 0,1 мм, непроплавы – до 0,05х0,20 мм, трещины – до 8,0 мм. В образцах, выращенных при мощности 1800 Вт, – поры до 0,1мм, трещины – до 2,5 мм. В образцах, выращенных при мощности лазерного излучения 2000 Вт дефекты не обнаружены. В образцах, выращенных при мощности 2200 Вт, – трещины до 0,5 мм.

В микроструктуре образцов после термообработки наблюдаются структуры, характерные для упорядоченных твёрдых растворов на основе никеля – видно чередование фаз пластинчатой формы. Однако твёрдость этих образцов по окончании проведённой термообработки в долевом и поперечном направлении отличаются, различие в значениях составляет до 20%, при этом упорядочивание должно приводить к получению более однородных свойств и повышению прочностных характеристик [162-167]. Результаты измерения механических свойств представлены в таблице 3.9 и на рисунках (рисунке 3.9-3.13).

Таблица 3.9 – Механические свойства образцов без термообработки

| № режима       | Направление вырезки образцов | $\sigma_b$ , МПа | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\delta$ , % | $\Psi$ , % | НВ    |
|----------------|------------------------------|------------------|----------------------|--------------|------------|-------|
| 1<br>(1200 Вт) | долевое                      | 862,0            | 611,0                | 36,2         | 37,3       | 243   |
|                |                              | 851,2            | 616,8                | 37,3         | 38,8       | 255   |
|                |                              | 864,9            | 606,0                | 38,1         | 44,3       | 257   |
|                | <i>среднее значение</i>      | 859,4            | 611,3                | 37,2         | 40,1       | 251,7 |
|                | поперечное                   | 853,2            | 596,2                | 32,4         | 25,4       | 256   |
|                |                              | 850,2            | 596,2                | 31,5         | 29,7       | 237   |
|                |                              | 858,1            | 609,0                | 34,7         | 31,2       | 236   |
|                | <i>среднее значение</i>      | 853,8            | 600,5                | 32,9         | 28,8       | 243,0 |
| 2<br>(1400 Вт) | долевое                      | 904,2            | 583,5                | 26,3         | 49,8       | 232   |
|                |                              | 896,3            | 577,6                | 25,9         | 50         | 244   |
|                |                              | 899,3            | 588,4                | 26,8         | 49,9       | 245   |
|                | <i>среднее значение</i>      | 899,9            | 583,2                | 26,3         | 49,9       | 240,3 |
|                | поперечное                   | 625,7            | 520,7                | 14,7         | 19,9       | 239   |
|                |                              | 627,6            | 504,1                | 16,5         | 20,4       | 235   |
|                |                              | 626,6            | 511,9                | 16,4         | 21,1       | 236   |
|                | <i>среднее значение</i>      | 626,6            | 512,2                | 15,9         | 20,5       | 236,7 |
| 3<br>(1600 Вт) | долевое                      | 868,9            | 526,6                | 25,2         | 19,1       | 223   |
|                |                              | 873,8            | 547,2                | 24,6         | 20,8       | 234   |
|                |                              | 862,0            | 536,4                | 25,3         | 19,4       | 234   |
|                | <i>среднее значение</i>      | 868,2            | 536,8                | 25,0         | 19,8       | 230,3 |
|                | поперечное                   | 770,8            | 526,6                | 24,6         | 23,2       | 223   |
|                |                              | 772,8            | 535,4                | 28,2         | 25,2       | 232   |
|                |                              | 758,1            | 534,5                | 22,6         | 22,1       | 236   |
|                | <i>среднее значение</i>      | 767,2            | 532,2                | 25,1         | 23,5       | 230,3 |
| 4<br>(1800 Вт) | долевое                      | 937,5            | 573,7                | 35,8         | 23,2       | 217   |
|                |                              | 936,5            | 560,0                | 36,5         | 24         | 226   |
|                |                              | 942,4            | 562,9                | 35,7         | 21,7       | 226   |
|                | <i>среднее значение</i>      | 938,8            | 565,5                | 36,0         | 23,0       | 223,0 |
|                | поперечное                   | 826,7            | 577,6                | 35,6         | 30,5       | 213   |
|                |                              | 822,8            | 566,8                | 36,6         | 29,7       | 221   |
|                |                              | 814,0            | 566,8                | 36,9         | 29,4       | 221   |
|                | <i>среднее значение</i>      | 821,1            | 570,4                | 36,4         | 29,9       | 218,3 |
| 5<br>(2000 Вт) | долевое                      | 974,8            | 599,2                | 25,1         | 44,7       | 203   |
|                |                              | 976,7            | 607,0                | 24,9         | 38,9       | 208   |
|                |                              | 973,8            | 608,0                | 24,8         | 45,1       | 208   |
|                | <i>среднее значение</i>      | 975,1            | 604,7                | 24,9         | 42,9       | 206,3 |
|                | поперечное                   | 808,1            | 546,2                | 39,2         | 44,8       | 197   |
|                |                              | 797,3            | 549,2                | 38,8         | 32,9       | 197   |
|                |                              | 807,1            | 549,2                | 41           | 43,1       | 199   |
|                | <i>среднее значение</i>      | 804,1            | 548,2                | 39,7         | 40,3       | 197,7 |
| 6<br>(2200 Вт) | долевое                      | 958,1            | 588,4                | 30,0         | 32,0       | 208   |
|                |                              | 958,6            | 585,5                | 27,7         | 29,5       | 215   |
|                |                              | 960,1            | 587,5                | 28,3         | 31,4       | 215   |
|                | <i>среднее значение</i>      | 959,0            | 587,1                | 28,6         | 30,9       | 212,7 |
|                | поперечное                   | 818,9            | 563,4                | 35,9         | 36,2       | 204   |
|                |                              | 811,5            | 559,5                | 36,2         | 29,8       | 208   |
|                |                              | 812,0            | 559,5                | 37,5         | 34,8       | 209   |
|                | <i>среднее значение</i>      | 814,1            | 560,8                | 36,5         | 33,6       | 207,0 |

Механические свойства образцов после термообработки представлены в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Механические свойства образцов после термообработки

| № режима                          | Направление вырезки образцов | $\sigma_b$ , МПа | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\delta$ , % | $\Psi$ , % | HB    |
|-----------------------------------|------------------------------|------------------|----------------------|--------------|------------|-------|
| 1<br>(1200 Вт)                    | долевое                      | 957,1            | 564,9                | 29,7         | 27,6       | 285   |
|                                   |                              | 950,3            | 567,8                | 29,4         | 27,9       | 300   |
|                                   |                              | 946,3            | 560,0                | 32,1         | 30,4       | 298   |
|                                   | <i>среднее значение</i>      | 951,2            | 564,2                | 30,4         | 28,6       | 294   |
|                                   | поперечное                   | 948,3            | 589,4                | 24,9         | 15,7       | 285   |
|                                   |                              | 949,3            | 546,2                | 25,4         | 18,8       | 302   |
|                                   |                              | 989,5            | 568,8                | 25,5         | 17,3       | 285   |
|                                   | <i>среднее значение</i>      | 962,4            | 568,1                | 25,3         | 17,3       | 291   |
| 2<br>(1400 Вт)                    | долевое                      | 999,3            | 629,6                | 32,7         | 41,1       | 283   |
|                                   |                              | 967,9            | 626,6                | 33,8         | 40,4       | 285   |
|                                   |                              | 1002,2           | 634,5                | 33,0         | 40,2       | 285   |
|                                   | <i>среднее значение</i>      | 989,8            | 630,2                | 33,2         | 40,6       | 284   |
|                                   | поперечное                   | 720,8            | 547,2                | 6,2          | 8,6        | 306   |
|                                   |                              | 726,7            | 554,1                | 12,8         | 10,4       | 285   |
|                                   |                              | 718,8            | 557,0                | 6,1          | 9,1        | 285   |
|                                   | <i>среднее значение</i>      | 722,1            | 552,8                | 8,4          | 9,4        | 292   |
| 3<br>(1600 Вт)                    | долевое                      | 947,3            | 577,6                | 29,7         | 15,6       | 271   |
|                                   |                              | 926,7            | 578,6                | 28,9         | 13,7       | 272   |
|                                   |                              | 933,6            | 566,8                | 29,2         | 14,9       | 287   |
|                                   | <i>среднее значение</i>      | 935,9            | 574,3                | 29,3         | 14,7       | 277   |
|                                   | поперечное                   | 867,9            | 577,6                | 20,1         | 19,7       | 283   |
|                                   |                              | 875,7            | 566,8                | 19,5         | 18,1       | 282   |
|                                   |                              | 861,0            | 564,9                | 18,7         | 17,6       | 285   |
|                                   | <i>среднее значение</i>      | 868,2            | 569,8                | 19,4         | 18,5       | 283   |
| 4<br>(1800 Вт)                    | долевое                      | 966,0            | 593,3                | 25,2         | 19,7       | 263   |
|                                   |                              | 965,0            | 580,6                | 25,4         | 22,2       | 263   |
|                                   |                              | 982,6            | 571,7                | 24,8         | 19,3       | 262   |
|                                   | <i>среднее значение</i>      | 971,2            | 581,9                | 25,1         | 20,4       | 263   |
|                                   | поперечное                   | 937,5            | 583,5                | 29,0         | 27,0       | 269   |
|                                   |                              | 907,1            | 560,0                | 25,5         | 27,9       | 266   |
|                                   |                              | 923,8            | 562,9                | 26,0         | 26,9       | 265   |
|                                   | <i>среднее значение</i>      | 922,8            | 568,8                | 26,8         | 27,3       | 267   |
| 5<br>(2000 Вт)                    | долевое                      | 996,4            | 643,3                | 24,3         | 25,6       | 245   |
|                                   |                              | 1001,3           | 634,5                | 23,8         | 24,7       | 256   |
|                                   |                              | 999,3            | 646,3                | 24,6         | 23,9       | 249   |
|                                   | <i>среднее значение</i>      | 999,0            | 641,4                | 24,2         | 24,7       | 251   |
|                                   | поперечное                   | 973,8            | 599,2                | 25,2         | 15,8       | 262   |
|                                   |                              | 976,7            | 597,2                | 24,9         | 15,4       | 259   |
|                                   |                              | 974,8            | 608,0                | 24,8         | 15,3       | 256   |
|                                   | <i>среднее значение</i>      | 975,1            | 601,5                | 25,0         | 15,50      | 259   |
| 6<br>(2200 Вт)                    | долевое                      | 984,2            | 621,3                | 21,8         | 19,7       | 251   |
|                                   |                              | 986,1            | 610,5                | 20,6         | 20,5       | 256   |
|                                   |                              | 994,0            | 612,0                | 22,7         | 18,6       | 252   |
|                                   | <i>среднее значение</i>      | 988,1            | 614,6                | 21,7         | 19,6       | 253,0 |
|                                   | поперечное                   | 957,2            | 592,8                | 26           | 20         | 264   |
|                                   |                              | 943,4            | 580,1                | 23           | 20         | 261   |
|                                   |                              | 950,8            | 587,0                | 24           | 20         | 259   |
|                                   | <i>среднее значение</i>      | 950,5            | 586,6                | 24,4         | 19,9       | 261,3 |
| Справочные данные для сплава ВХ4Л |                              | 784,5-882,6      | 588,4-686,5          | 4-7          | 4-7        | -     |
| Справочные данные для сплава ВХ4А |                              | 931,6            | 637,4                | 25           | -          | 251   |



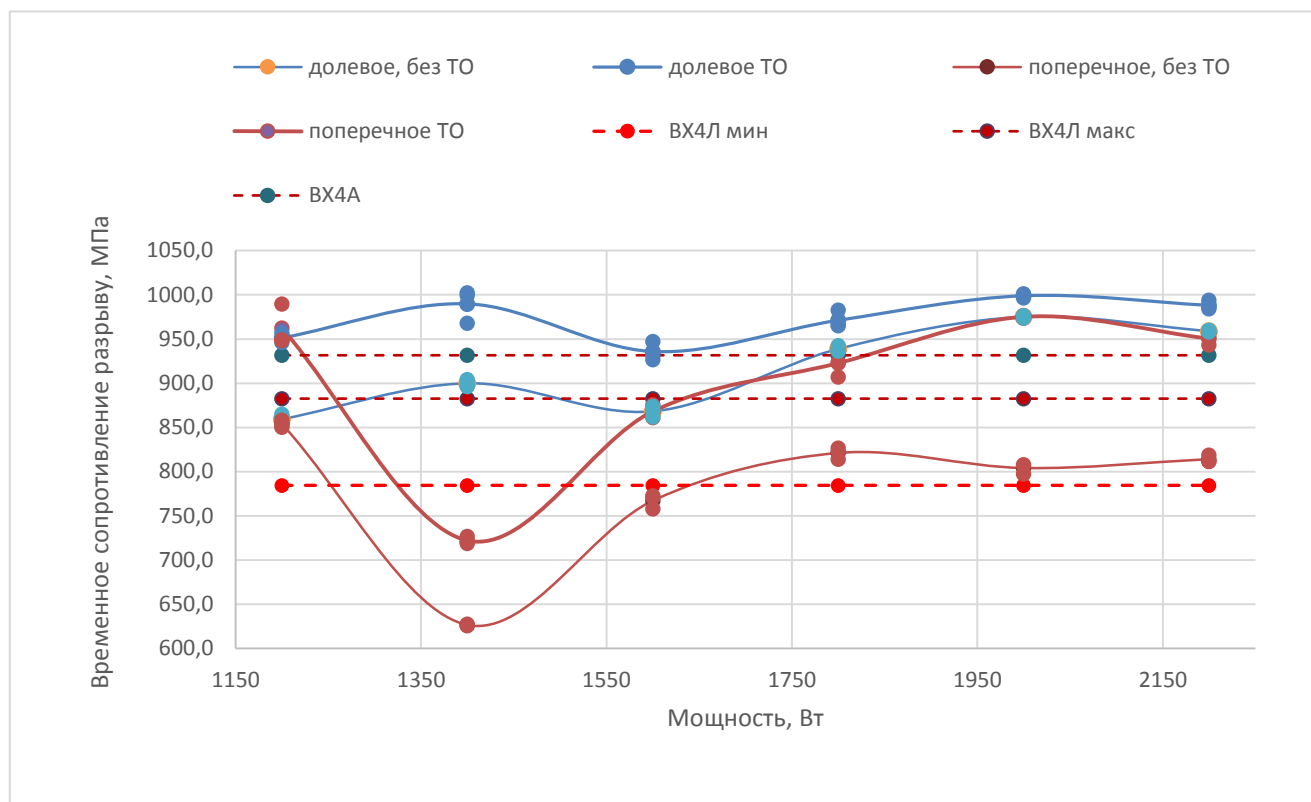


Рисунок 3.9 – График влияния мощности лазерного излучения на временное сопротивление разрыву с ТО и без ТО

Из рисунка 3.9 видно, что с увеличением мощности лазера от 1200 до 2200 Вт временное сопротивление разрыву и предел текучести образцов изменяются немонотонно. Для образцов с продольным направлением выращивания наблюдается незначительное увеличение временного сопротивления разрыву от 900 до 1000 МПа при увеличении мощности от 1200 до 2200 Вт, с незначительным минимумом при мощности 1600 Вт. Наиболее высокие значения прочности наблюдаются при мощности лазерного излучения около 1800 Вт. Эти же значения мощности приводят к получению высоких показателей относительного удлинения и невысоких значений относительного сужения. Проведение ТО приводит к повышению временного сопротивления разрыву в среднем на 10-15% для обоих типов образцов, при этом сам характер зависимости значительно не меняется. Необходимые значения прочности, определяемые в нормативно справочной литературе для сплава ВХ4, не достигаются только для образцов, выращенных при мощности 1400 Вт (рисунок 3.9).

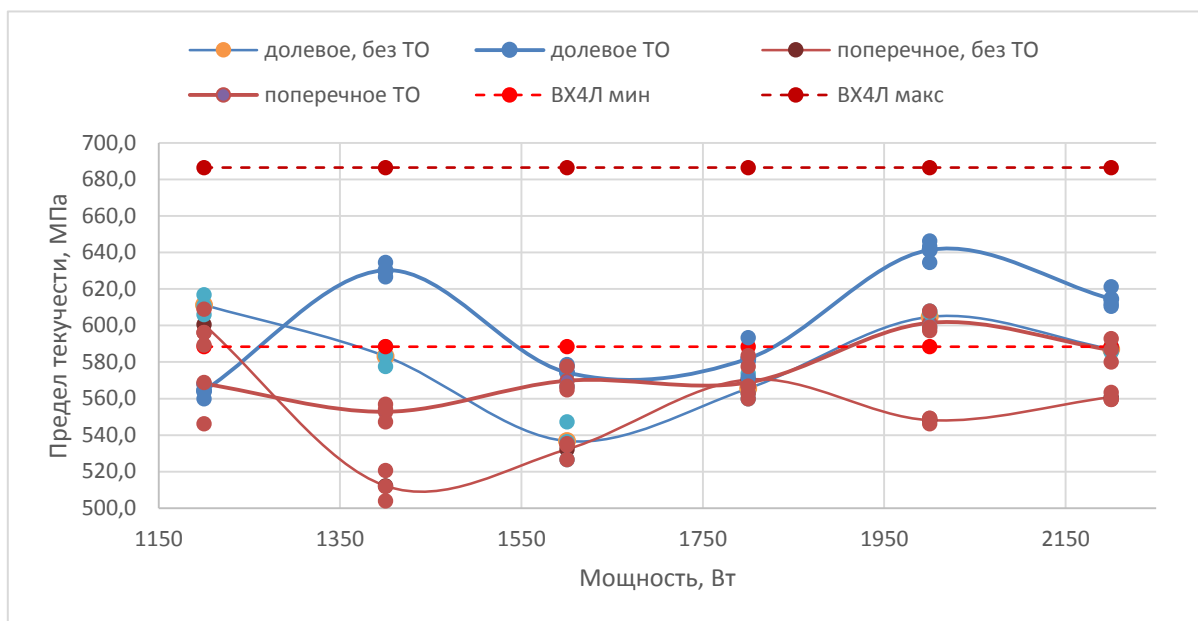


Рисунок 3.10 – График влияния мощности лазерного излучения на предел текучести

Термообработка также позволяет повысить предел текучести (рисунок 3.10) обоих типов образцов, при этом для поперечных образцов наблюдается практически монотонный рост предела текучести после термообработки с ростом мощности лазера. Для долевых образцов наблюдается максимум значений для мощности 1400 Вт, с последующим снижением для мощности 1600 и 1800 Вт, и затем наблюдается повышение предела текучести при мощности лазера 2000 Вт и 2200 Вт.

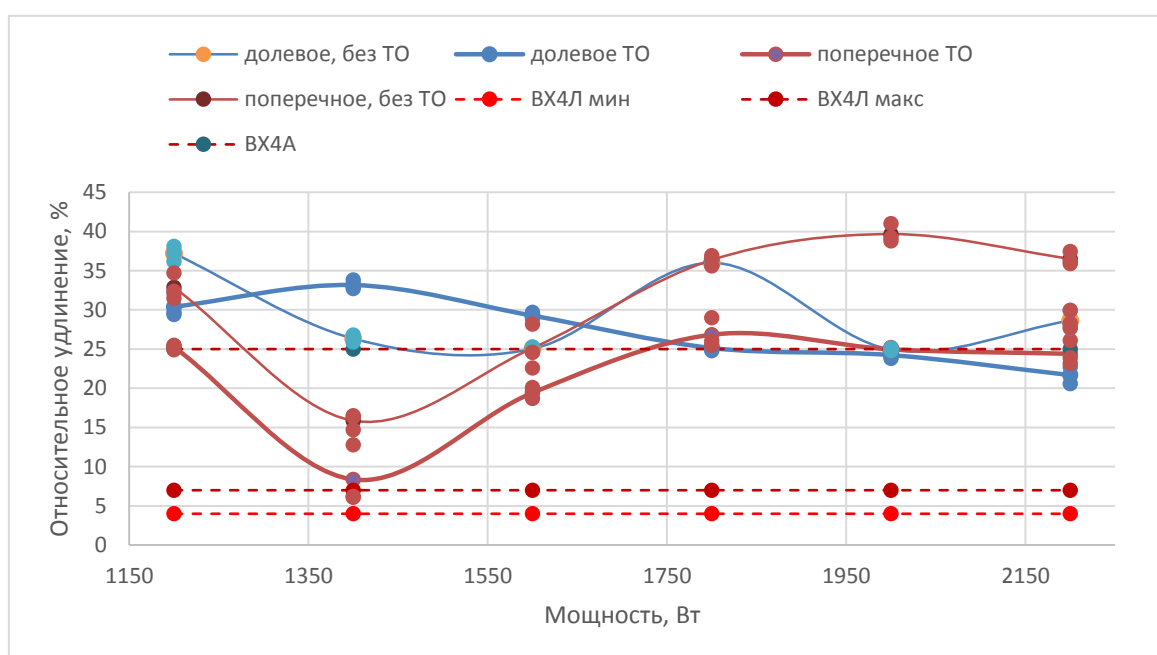


Рисунок 3.11 – График влияния мощности лазерного излучения на относительное удлинение

Относительное удлинение (рисунок 3.11) после термообработки поперечных образцов снижается в среднем на 20...30% относительно состояния без термообработки для всех значений мощности лазера, а для продольных образцов снижение относительного удлинения после термообработки наблюдается на мощности свыше 1400 Вт, в то время как для образцов без термообработки это снижение наблюдалось с увеличением мощности свыше 1200 Вт.

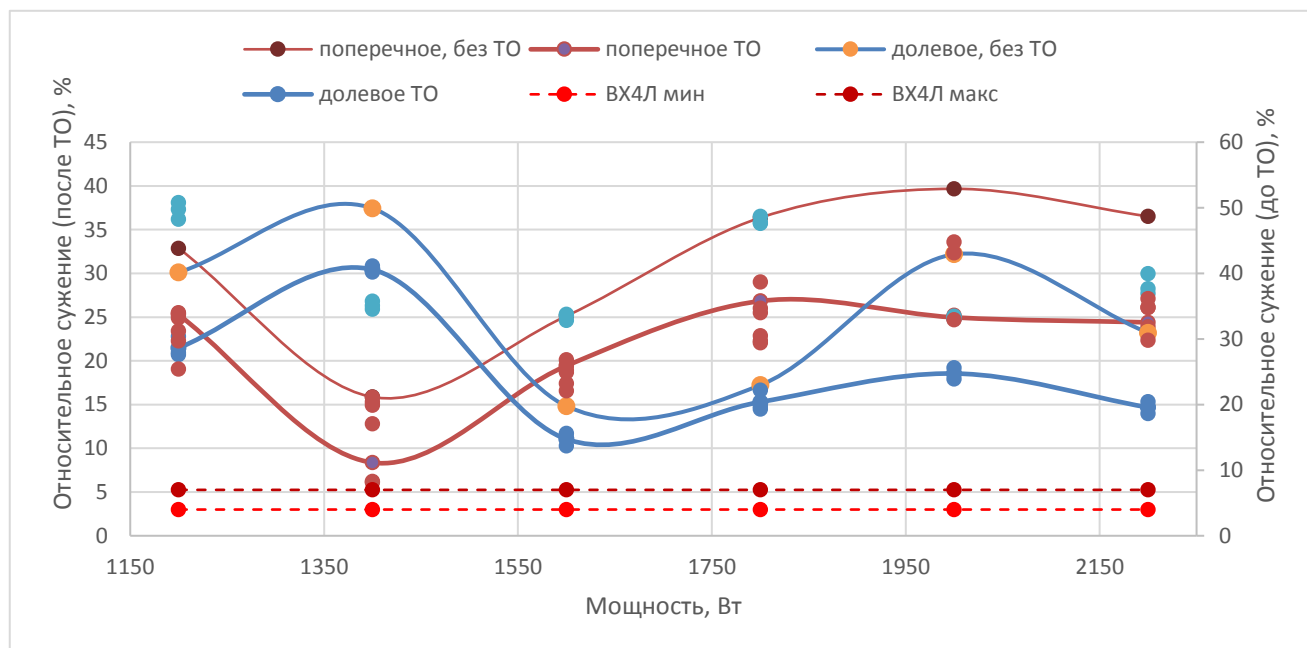


Рисунок 3.12 – График влияния мощности лазерного излучения на относительное сужение

Относительное сужение образцов после термообработки снижается для всех типов образцов, характер зависимости по сравнению с образцами без термообработки не меняется (рисунок 3.12).

Проведение термообработки приводит к повышению твёрдости в среднем на 30% по сравнению с образцами без обработки, с увеличением мощности лазера от 1200 до 2200 Вт твёрдость снижается в среднем на 15%, при этом значения получились выше, чем для сплава ВХ4А (рисунок 3.13). Твёрдость образцов для мощности 1800 Вт имеет пониженные на 20-25% значения по сравнению с уровнем мощности 1200...1600 Вт, но остаётся на довольно высоком уровне: около 210-230 НВ. Наибольшая твердость НВ 285-302 достигается после выращивания при мощности 1200 Вт и термообработки. Это может объясняться образованием в микроструктуре образцов упрочняющей  $\gamma'$ -фазы и дополнительных некогерентных

фаз, таких как  $\gamma'$ -фаза ( $\text{Ni}_3\text{Ti}$ ), Cr-фаза ( $\text{FeCr}$ ) и карбидов ( $\text{Me}_{23}\text{C}_6$  и  $\text{Me}_6\text{C}$ ), как показано в работе [167]. При этом полученные механические свойства соответствуют сплаву ВХ4Л или ВХ4А только после сплавления при мощности 1200 Вт, а для мощности 1800 Вт соответствуют ВХ4Л предел прочности и относительное удлинение.

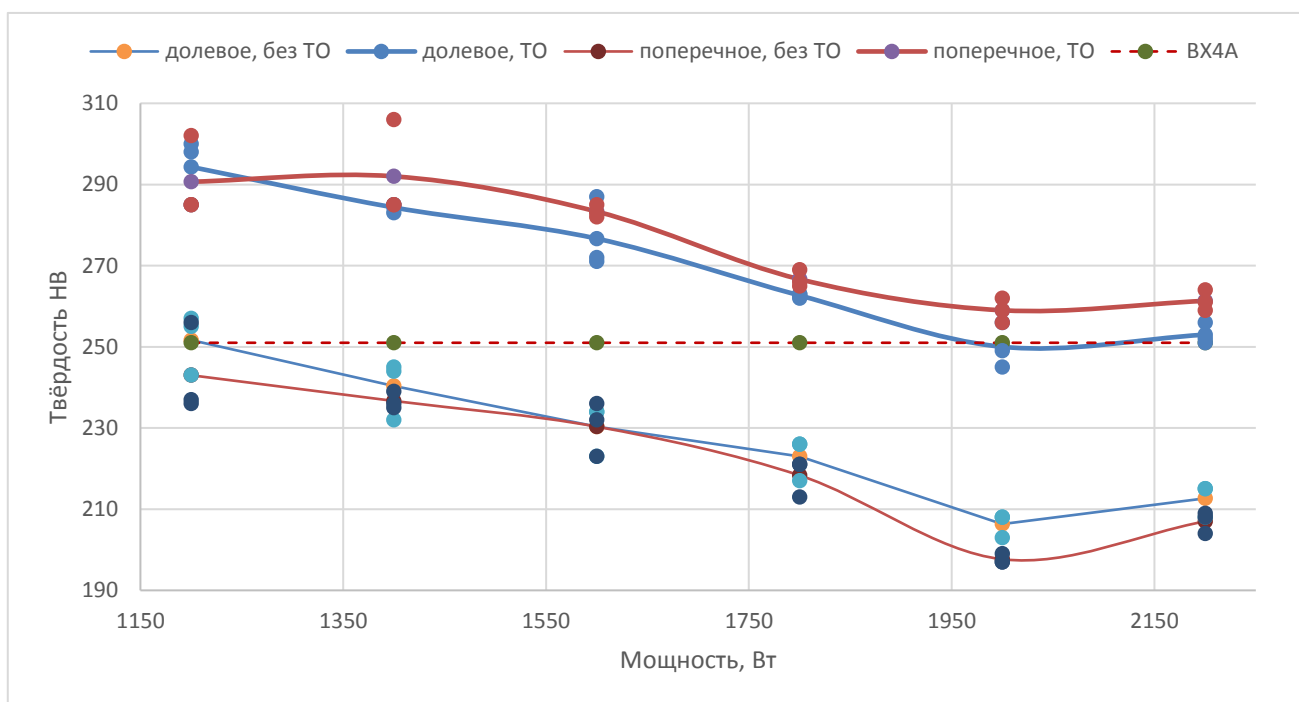
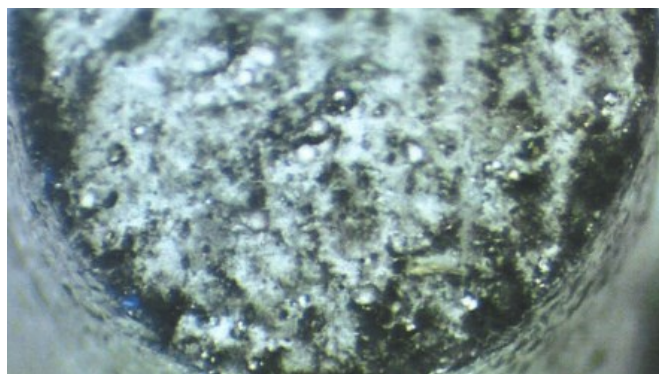


Рисунок 3.13 – График влияния мощности лазерного излучения на твердость

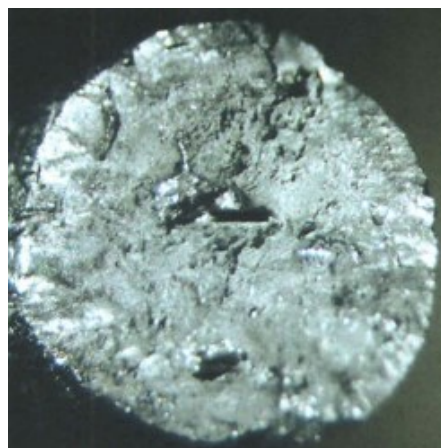
При исследовании изломов образцов (рисунок 3.14), установлено, что в изломах образцов, полученных при мощности 1400...1800 Вт, наблюдаются дефекты в виде непролагов и трещин, в изломах образцов режим 1 и 3 – нерасплавившиеся частицы металлического порошка. На поверхностях излома всех образцов присутствовали ямки и классическая форма чашечки и конуса, указывающие на вязкий механизм разрушения. С увеличением мощности лазера до 1400 Вт на поверхности излома наблюдается крупные непролавы. Во всех образцах доминирующим механизмом разрушения было слияние дефектов, трещин, непролагов, приводящее к разрушению, дефекты структуры способствуют зарождению излома.



Режим 1 x22



Режим 3 x12



Режим 4 x12

Рисунок 3.14 – Изломы разрывных образцов

Получение изделий из жаропрочных сплавов методом прямого лазерного выращивания должно приводить к достижению требуемых свойств, связанных со структурой и особенностями нагружения изделий. Для проведения механической обработки, связанной с формированием высокого качества поверхности и низкой шероховатостью, желательно сочетание низкой прочности и твёрдости материала заготовки. В этой связи рациональным режимом прямого лазерного выращивания заготовок из сплава ЭП648 является режим с мощностью лазерного излучения 2000 Вт, после которого были получены минимальные значения твёрдости. Однако высокие значения энергии нежелательны из-за значительных энерговложений в материал и появления трещин, которые являются причиной снижения прочности.

С другой стороны, механическая обработка лезвийным инструментом может производиться на поверхностях, ориентированных произвольно по отношению к оси выращивания, тогда анизотропия свойств может оказывать негативное влияние на износ инструмента: на поверхностях с повышенными значениями прочности и

### 3.4.1 Корреляционный анализ для образцов без проведения термообработки

Таблица 3.11 – Коэффициенты ранговой корреляции для образцов, вырезанных в поперечном направлении

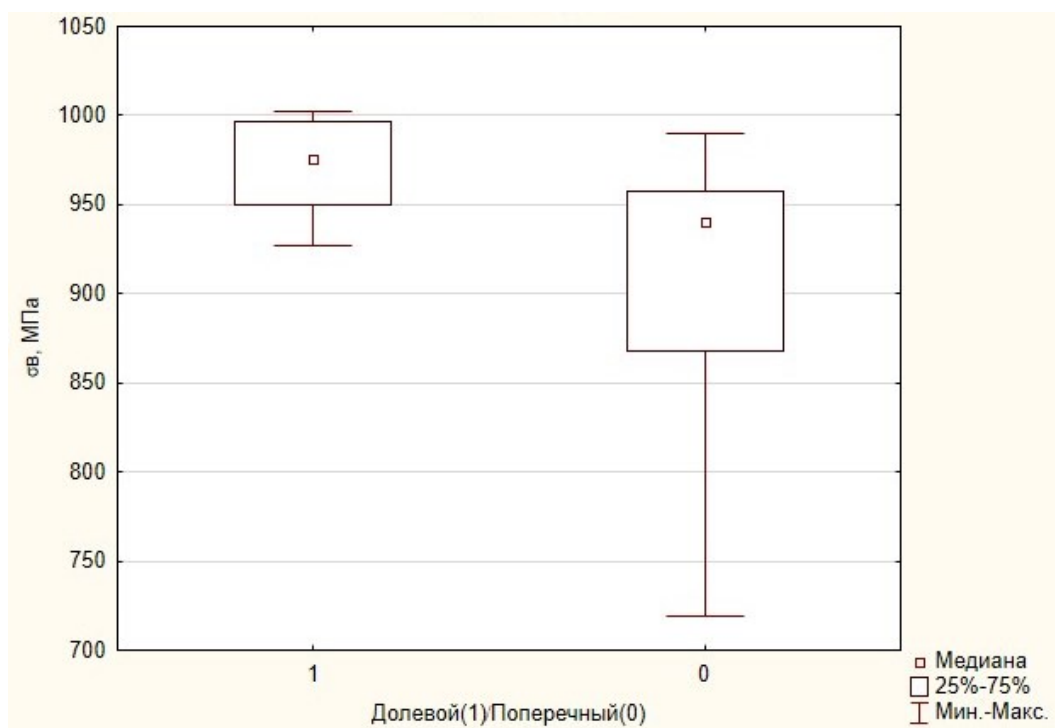
[illegible]

Таблица 3.12 – Коэффициенты ранговой корреляции для образцов, вырезанных в продольном направлении

| Переменная                                         | Среднее | Ср. откл. | Мощность,<br>Р, Вт | $\sigma_b$ ,<br>МПа | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\delta$ , % | $\Psi$ , % | НВ     |
|----------------------------------------------------|---------|-----------|--------------------|---------------------|----------------------|--------------|------------|--------|
| Мощность, Р, Вт                                    | 1600    | 292,770   | 1,000              | 0,875               | -0,157               | -0,381       | -0,255     | -0,944 |
| $\sigma_b$ , МПа                                   | 908,292 | 45,216    | 0,875              | 1,000               | 0,229                | -0,231       | 0,154      | -0,842 |
| $\sigma_{0,2}$ , МПа                               | 580,289 | 28,688    | -0,157             | 0,229               | 1,000                | 0,278        | 0,746      | 0,103  |
| $\delta$ , %                                       | 29,900  | 5,718     | -0,381             | -0,231              | 0,278                | 1,000        | -0,158     | 0,446  |
| $\Psi$ , %                                         | 35,133  | 12,301    | -0,255             | 0,154               | 0,746                | -0,158       | 1,000      | 0,177  |
| НВ                                                 | 230,333 | 16,745    | -0,944             | -0,842              | 0,103                | 0,446        | 0,177      | 1,000  |
| Отмеченные корреляции значимы на уровне $p < 0,05$ |         |           |                    |                     |                      |              |            |        |

В продольном направлении наблюдается большая вариабельность откликов, которые мало связаны между собой за исключением предела прочности и твердости. Выявленная выделяемость этих показателей свидетельствует об упрочнении материала вследствие термических напряжений, что вызывает необходимость проведения последующей термической обработки. В поперечном направлении эффект упрочнения сказывается в меньшей степени из-за направленности залегания остаточных напряжений вдоль направления выращивания.

Непараметрический анализ для образцов без проведения термообработки проводился по двум группам в разрезе оценки влияния направления выращивания на отклики (характеристики механических свойств). Результаты представлены в виде диаграмм размаха (рисунок 3.15-3.19).

Рисунок 3.15 – Диаграмма размаха по группам  $\sigma_b$ , МПа



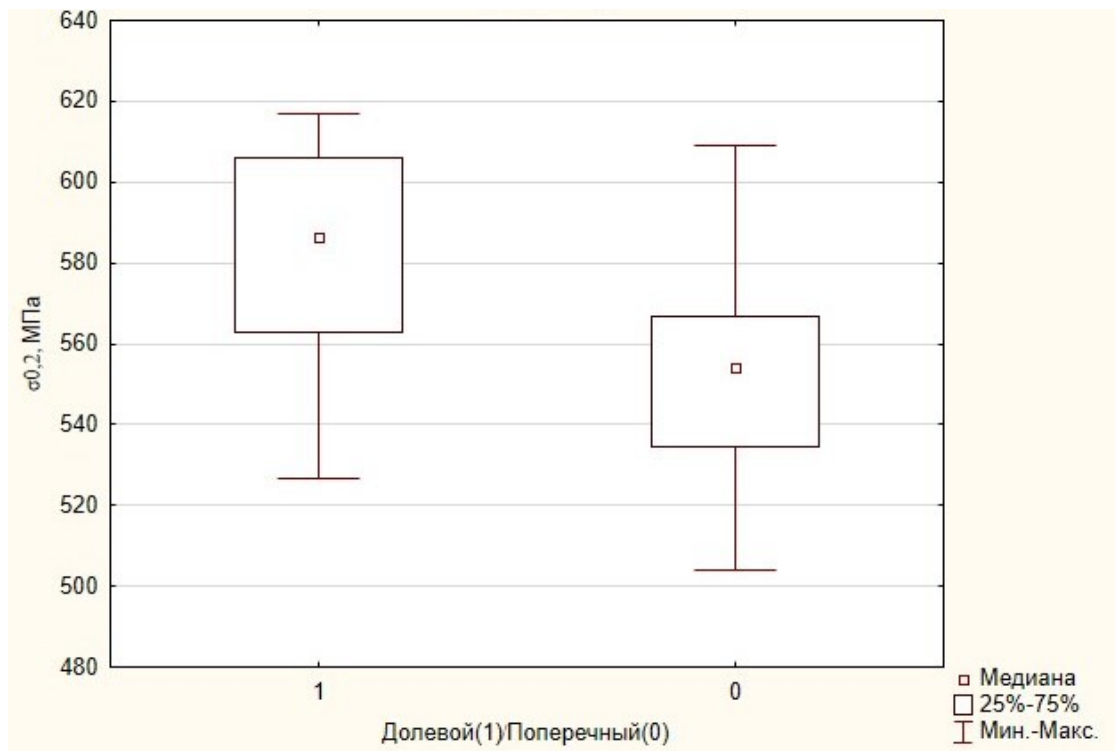


Рисунок 3.16 – Диаграмма размаха по группам  $\sigma_{0,2}$ , МПа

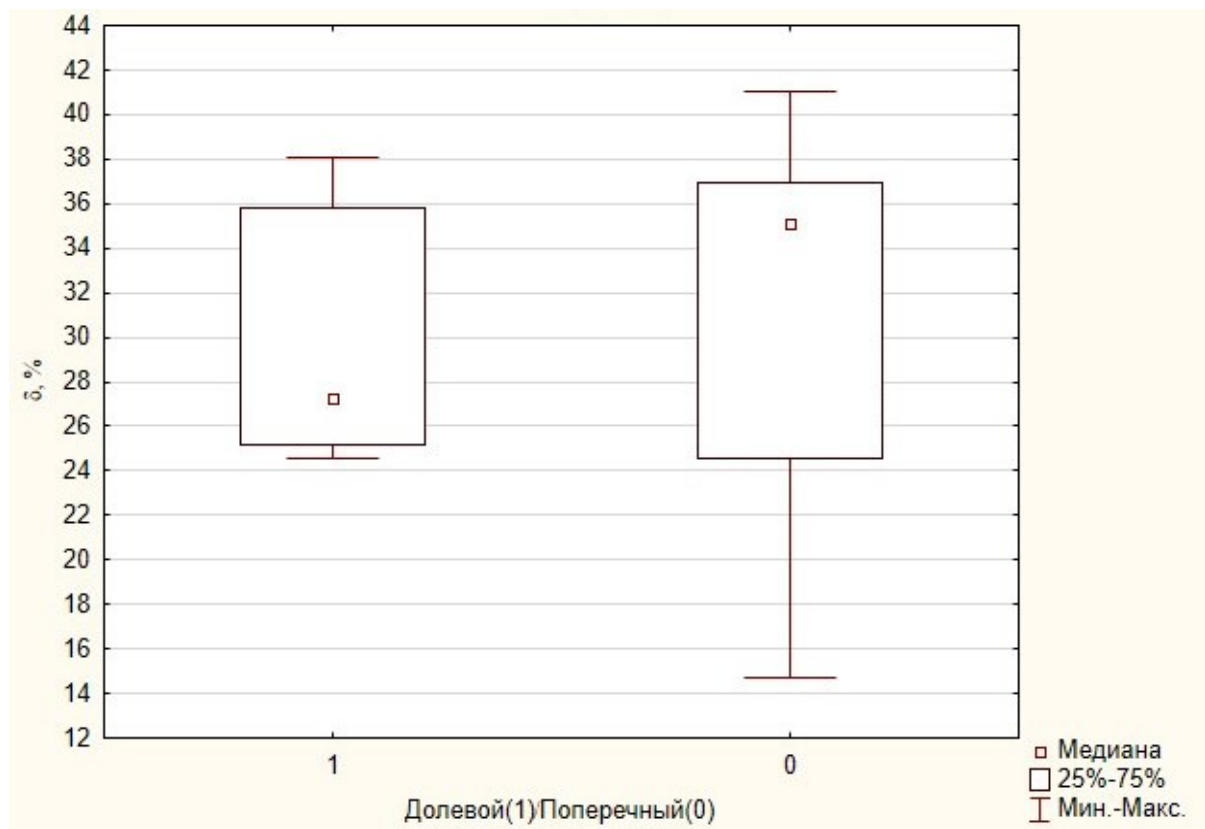


Рисунок 3.17 – Диаграмма размаха по группам  $\delta$ , %



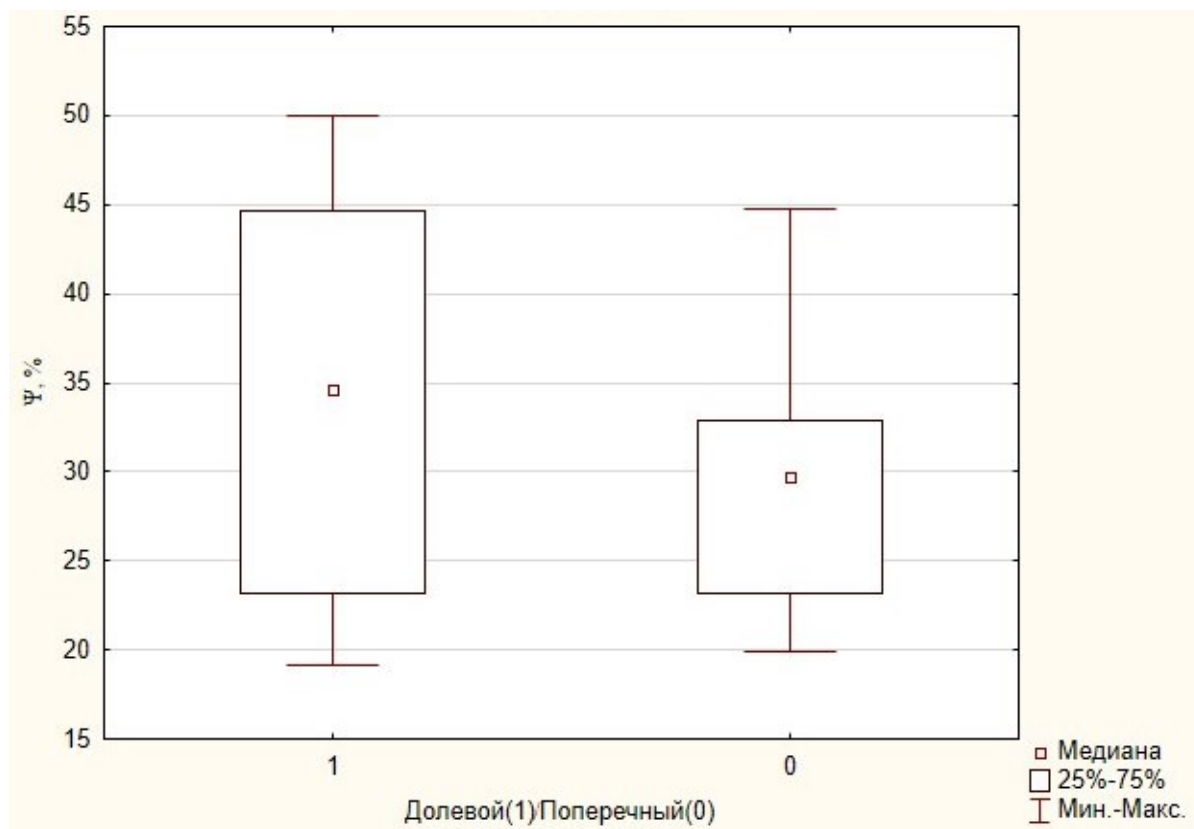
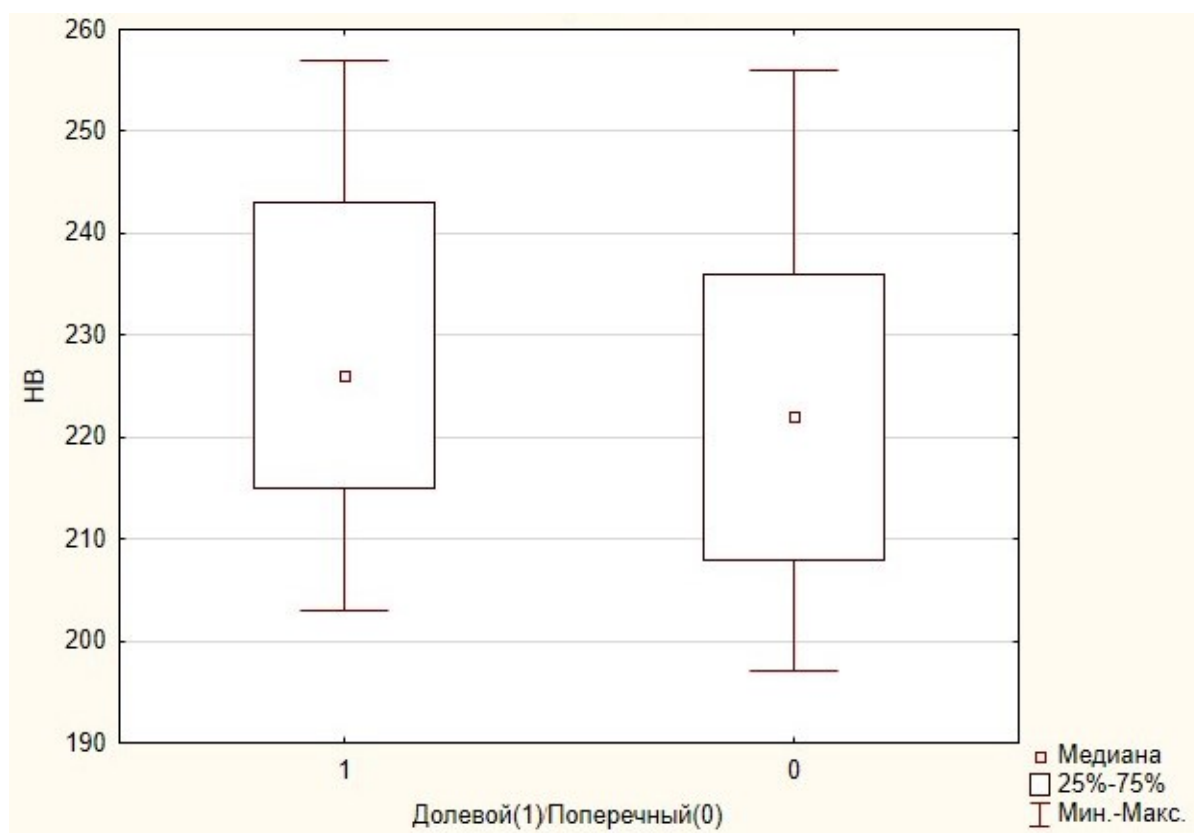
Рисунок 3.18 – Диаграмма размаха по группам  $\psi$ , %

Рисунок 3.19 – Диаграмма размаха по группам HB

Непараметрический анализ подтверждает выводы корреляционного анализа:

- большая вариабельность откликов (механических характеристик) в продольном направлении из-за наличия остаточных напряжений, направленных вдоль направления выращивания, т.е. вдоль треков;
- устойчивое различие в механических характеристиках по группам только для предела прочности;
- необходимость в проведении термической обработки для снижения влияния остаточных напряжений.

#### ***3.4.2 Регрессионный анализ для образцов без проведения термообработки***

Целью регрессионного анализа являлось определение рациональных значений мощности излучения в зависимости от влияния мощности на статические механические характеристики для назначения технологических параметров выращивания.

Для определения рациональных значений использовались зависимости третьего порядка относительно мощности излучения  $P$ , Вт:

$$v = a_0 + a_1 \cdot P + a_2 \cdot P^2 + a_3 \cdot P^3,$$

где  $v$  – отклик (зависимая характеристика механических свойств);

$a_0...a_3$  – коэффициенты зависимости.

Регрессионная модель влияния мощности лазерного излучения на предел прочности (предел временного сопротивления на разрыв,  $\sigma_v$ , МПа) для образцов, вырезанных в продольном направлении,  $\sigma_{v.np}$  выглядит следующим образом:

$$\sigma_{v.np} = 886 + 0,339 \cdot P + 0,38 \cdot 10^{-3} \cdot P^2 - 0,95 \cdot 10^{-7} \cdot P^3.$$

Графическая интерпретация регрессионной модели влияния мощности лазерного излучения на зависимую переменную  $\sigma_{v.np}$ , вырезанных в продольном направлении представлена на рисунке 3.20. С увеличением мощности лазерного излучения до 2000 Вт происходит увеличение значения временного сопротивления на разрыв, при дальнейшем увеличении лазерного излучения до 2200 Вт наблюдается снижение предела прочности.

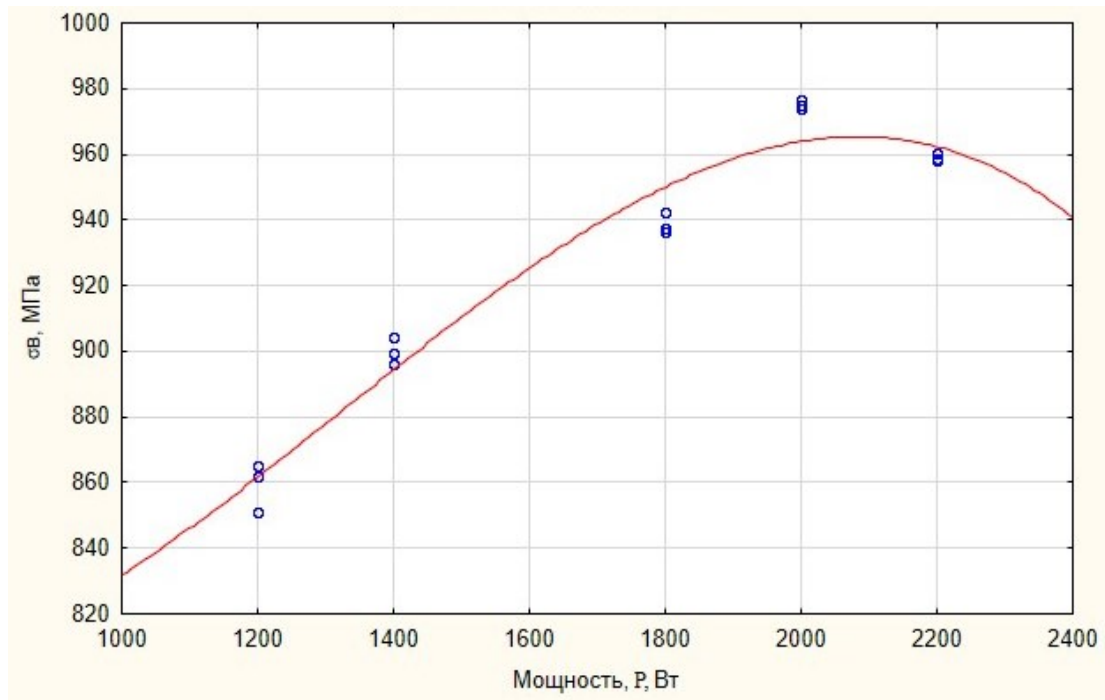


Рисунок 3.20 – График зависимости предела прочности образцов, вырезанных в продольном направлении, от мощности лазерного излучения

Регрессионная модель влияния мощности лазерного излучения на предел прочности, для образцов, вырезанных в поперечном направлении, определяется зависимостью:

$$\sigma_{в.п} = -8091 + 13,7 \cdot P - 6,98 \cdot 10^{-3} \cdot P^2 + 0,118 \cdot 10^{-5} \cdot P^3.$$

Графическая интерпретация регрессионной модели влияния мощности лазерного излучения на зависимую переменную предел временного сопротивления на разрыв, на образцах, вырезанных в поперечном направлении  $\sigma_{в.п}$ , МПа относительно направления выращивания, представлена на рисунке 3.21. С увеличением мощности лазерного излучения до 1800 Вт происходит увеличение значения временного сопротивления, далее при мощности 2000 Вт происходит снижение временного сопротивления на разрыв и при величине лазерного излучения 2200 Вт временное сопротивление возрастает.

Регрессионная модель влияния мощности лазерного излучения на относительное удлинение, для образцов, вырезанных в продольном направлении,  $\delta_{пр}$ , % определена следующим образом:

$$\delta_{пр} = 487 - 0,81 \cdot P + 0,469 \cdot 10^{-3} \cdot P^2 - 0,89 \cdot 10^{-7} \cdot P^3.$$

Графическая интерпретация регрессионной модели влияния мощности лазерного излучения на зависимую переменную  $\delta_{np}$ , %, на образцах, вырезанных в продольном направлении относительно направления выращивания, представлена на рисунке 3.22.

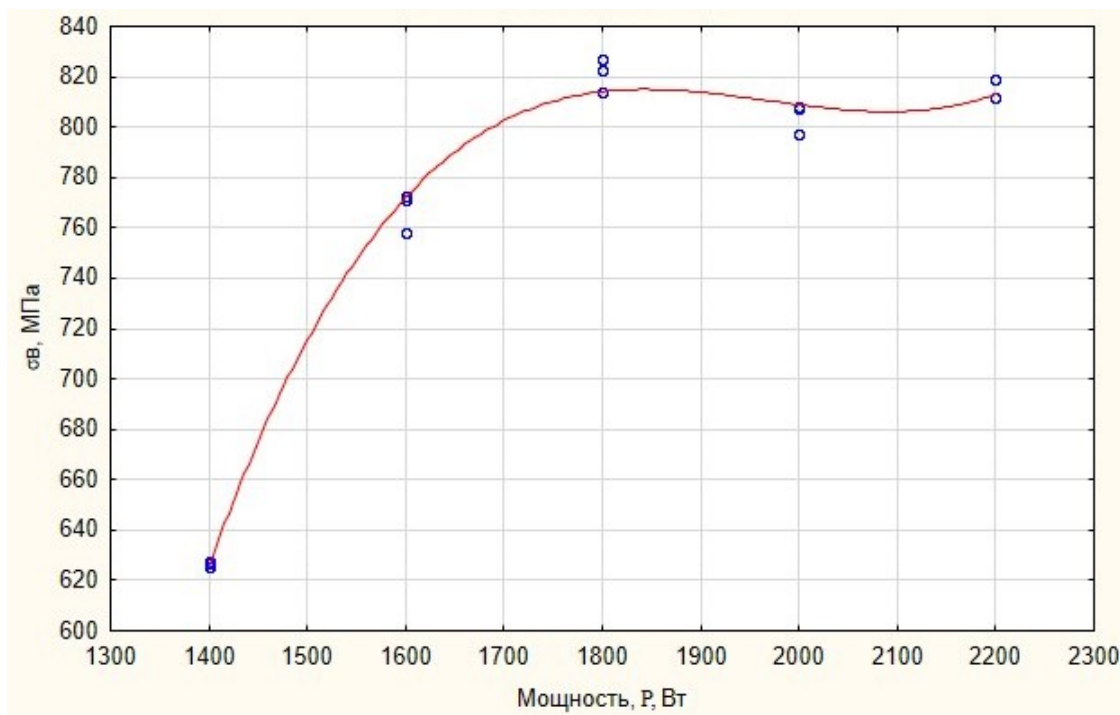


Рисунок 3.21 – График зависимости предела прочности образцов, вырезанных в поперечном направлении, от мощности лазерного излучения

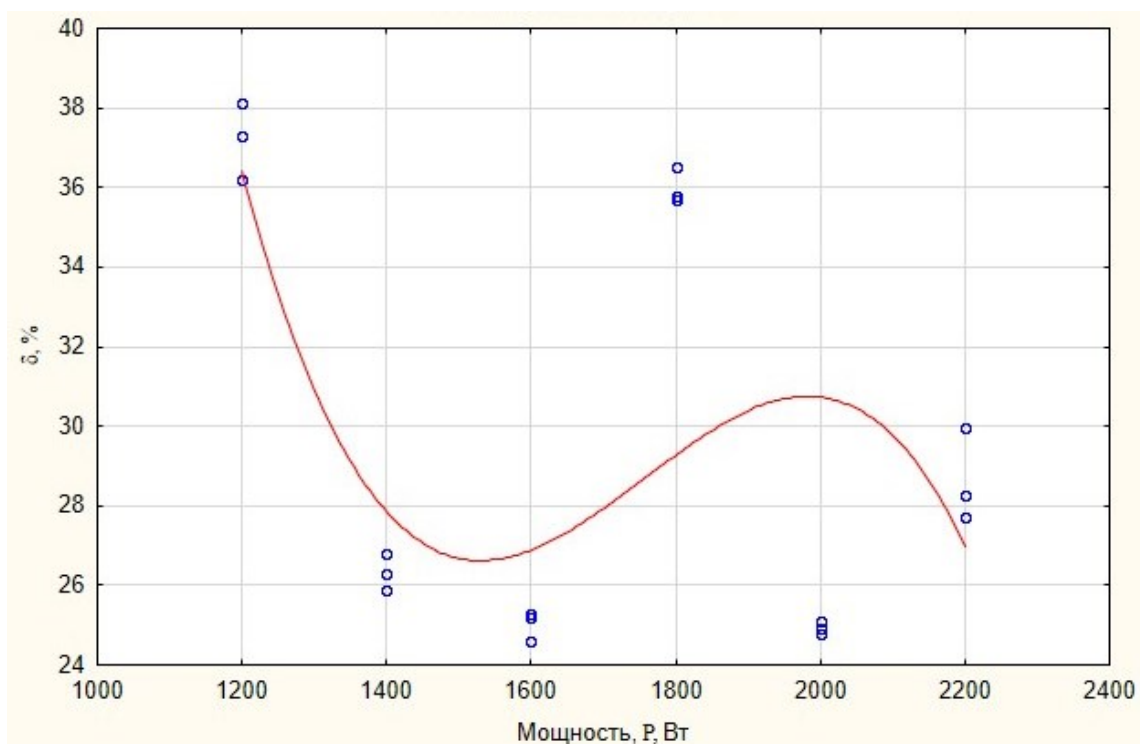


Рисунок 3.22 – График зависимости относительного удлинения образцов, вырезанных в продольном направлении, от мощности лазерного излучения

При мощности лазерного излучения 1200 Вт относительное удлинение имеет наибольшие значения, при мощности 1600 Вт происходит снижение значений относительного удлинения (на 10 единиц), при увеличении величины лазерного излучения до 2000 Вт наблюдается рост значений относительного удлинения. При мощности лазерного излучения 2200 Вт значение относительного удлинения уменьшается. Волнообразный характер кривой на графике зависимости относительного удлинения образцов, вырезанных в продольном направлении, от мощности лазерного излучения (рисунок 3.22) можно объяснить наличием в структуре образцов несплавленных порошинок, а также трещин и направлением выращивания образцов.

Влияние мощности лазерного излучения на относительное удлинение  $\delta_n$  (%) для образцов, вырезанных в поперечном направлении, выглядит следующим образом и описывается регрессионной зависимостью:

$$\delta_n = 285 - 0,602 \cdot P + 0,415 \cdot 10^{-3} \cdot P^2 - 0,88 \cdot 10^{-7} \cdot P^3.$$

Графическая интерпретация регрессионной модели влияния мощности лазерного излучения на зависимую переменную  $\delta_n$  (%) на образцах, вырезанных в поперечном направлении относительно направления выращивания, представлена на рисунке 3.23. При мощности лазерного излучения 1200 Вт относительное удлинение имеет наименьшие значения, при мощности 2000 Вт наблюдается максимальное значение относительного удлинения. При мощности лазерного излучения 2200 Вт значение относительного удлинения уменьшается.

Регрессионная модель влияния мощности лазерного излучения на твердость по Бринеллю для образцов, вырезанных в продольном направлении,  $HB_{np}$ , выглядит следующим образом:

$$HB_{np} = -4,92 - 0,572 \cdot P - 0,4 \cdot 10^{-3} \cdot P^2 + 0,837 \cdot 10^{-7} \cdot P^3.$$

Графическая интерпретация регрессионной модели влияния мощности лазерного излучения на зависимую переменную  $HB_{np}$ , твердость по Бринеллю, на образцах, вырезанных в продольном направлении относительно направления выращивания, представлена на рисунке 3.24.

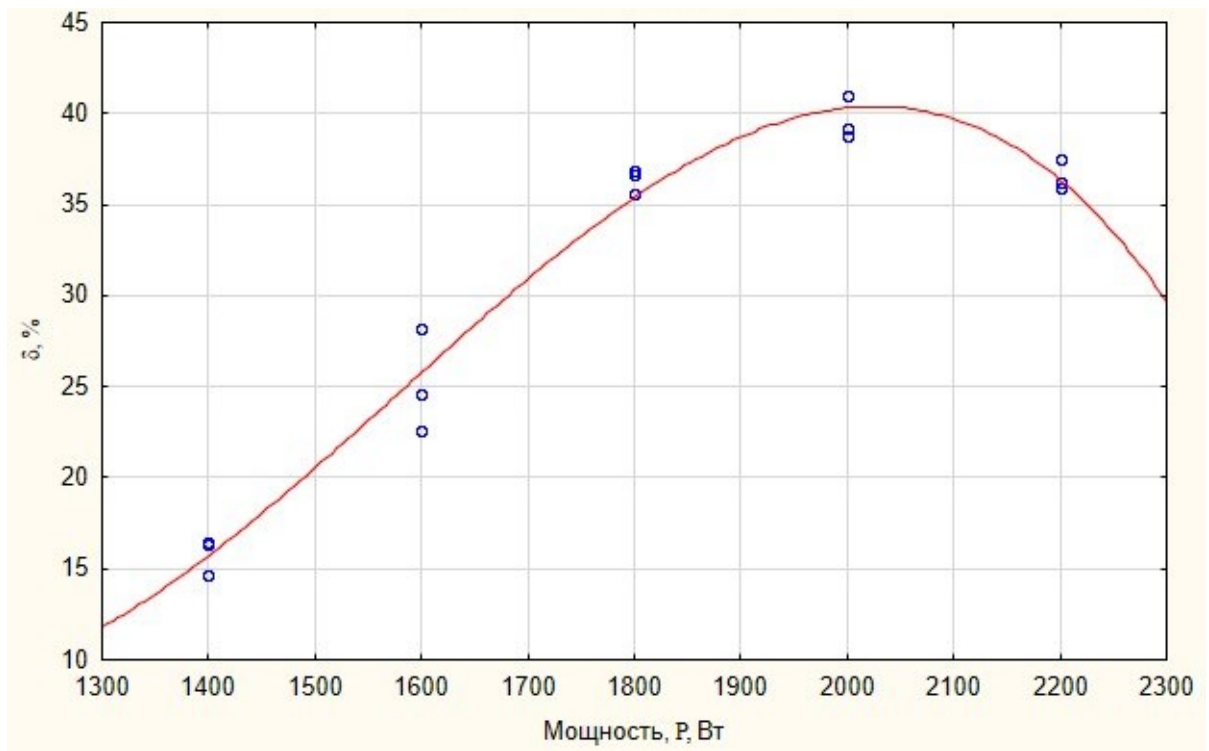


Рисунок 3.23 – График зависимости относительного удлинения образцов, вырезанных в поперечном направлении, от мощности лазерного излучения

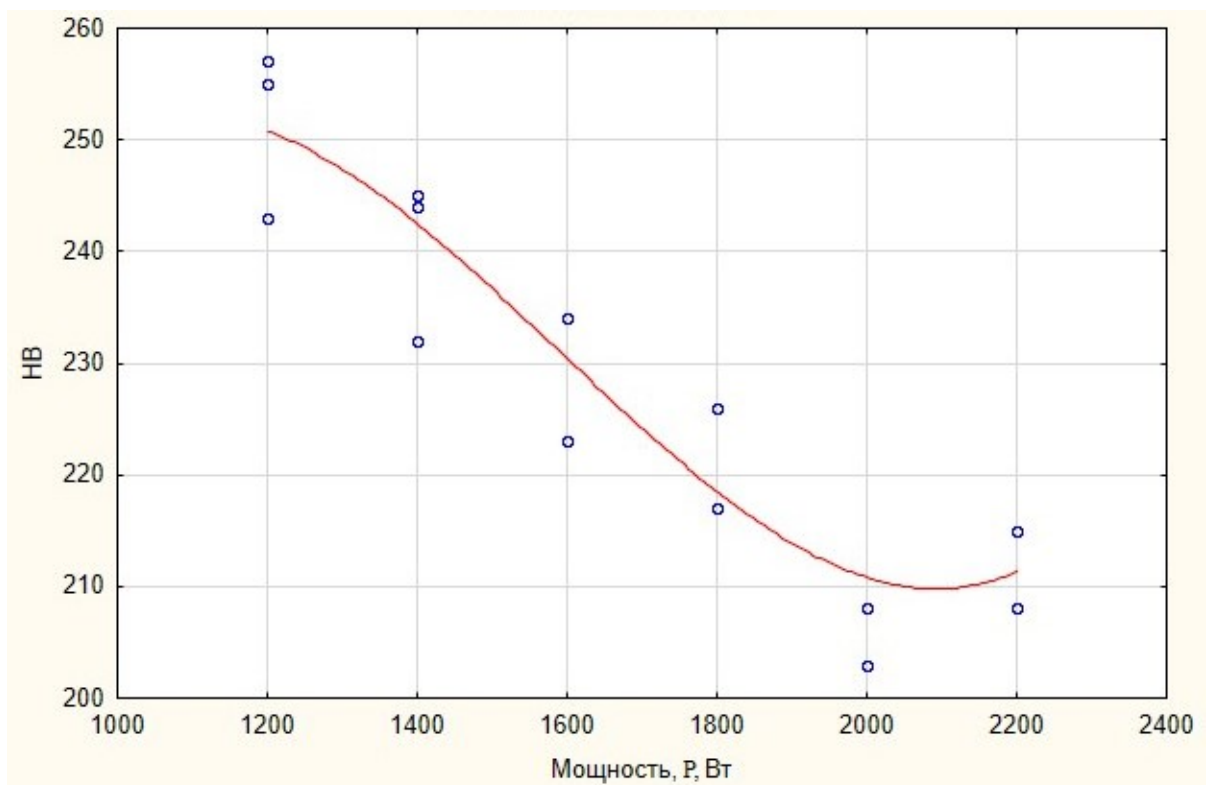


Рисунок 3.24 – График зависимости твердости по Бринеллю образцов, вырезанных в продольном направлении, от мощности лазерного излучения

При мощности лазерного излучения 1200 Вт твердость по Бринеллю  $HB_{np}$  имеет наибольшие значения, при мощности 2000 Вт наименьшие значения  $HB_{np}$ , при увеличении величины лазерного излучения до 2200 Вт наблюдается незначительный рост значений  $HB_{np}$ .

Влияние мощности лазерного излучения на твердость по Бринеллю, для образцов, вырезанных в поперечном направлении,  $HB_n$ , описывается регрессионной зависимостью:

$$HB_n = -1647 + 3,37 \cdot P + 1,97 \cdot 10^{-2} \cdot P^2 + 0,372 \cdot 10^{-6} \cdot P^3.$$

Графическая интерпретация регрессионной модели влияния мощности лазерного излучения на зависимую переменную  $HB_n$ , твердость по Бринеллю, на образцах, вырезанных в поперечном направлении относительно направления выращивания, представлена на рисунке 3.25. При мощности лазерного излучения 1200 Вт твердость по Бринеллю  $HB_n$  имеет наибольшие значения, при мощности 2000 Вт наименьшие значения  $HB_n$ , при увеличении величины лазерного излучения до 2200 Вт наблюдается незначительный рост значений  $HB_n$ .

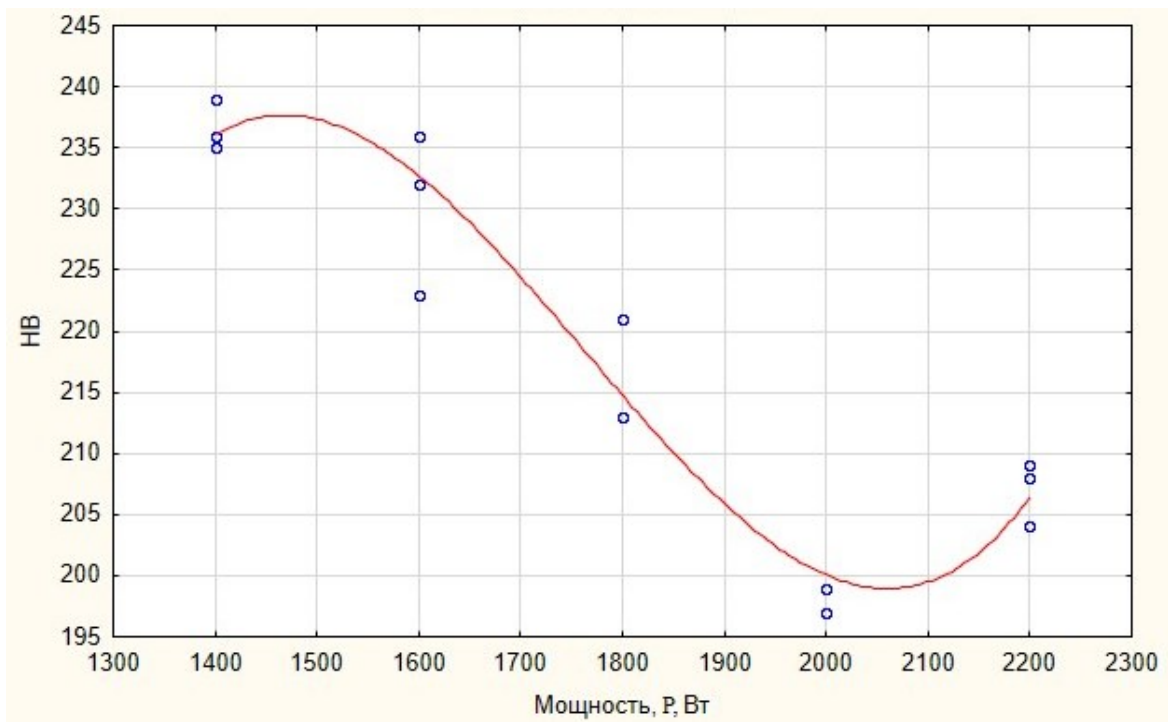


Рисунок 3.25 – График зависимости твердости по Бринеллю образцов, вырезанных в поперечном направлении, от мощности лазерного излучения

Адекватность моделирования оценивалась по коэффициенту детерминации  $R$ , значения коэффициентов приведены в таблице 3.13.

Таблица 3.13 – Оценка адекватности регрессионных моделей

| Направление выращивания | Предел прочности | Относительное удлинение | Твердость по Бринеллю |
|-------------------------|------------------|-------------------------|-----------------------|
| Продольное              | $R = 0,98$       | $R = 0,648$             | $R = 0,941$           |
| Поперечное              | $R = 0,996$      | $R = 0,988$             | $R = 0,964$           |

### 3.4.3 Корреляционный анализ для образцов после термической обработки

Выявление статистических связей между зависимыми переменными (откликами) и независимыми переменными с помощью коэффициентов корреляций Спирмена. Условно значимые связи ( $r > 0,55$ ) выделены красным цветом, для образцов, вырезанных в поперечном направлении (таблица 3.14), для образцов, вырезанных в продольном направлении – таблица 3.15.

Таблица 3.14 – Корреляции для образцов, вырезанных в поперечном направлении

| Переменная                                         | Среднее | Ср. откл. | Мощность, Р, Вт | $\sigma_b$ , МПа | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\delta$ , % | $\Psi$ , % | НВ     |
|----------------------------------------------------|---------|-----------|-----------------|------------------|----------------------|--------------|------------|--------|
| Мощность, Р, Вт                                    | 1700    | 351,468   | 1,000           | 0,421            | 0,642                | 0,396        | 0,365      | -0,872 |
| $\sigma_b$ , МПа                                   | 900,174 | 89,959    | 0,421           | 1,000            | 0,662                | 0,939        | 0,563      | -0,580 |
| $\sigma_{0,2}$ , МПа                               | 574,593 | 18,599    | 0,641           | 0,662            | 1,000                | 0,557        | 0,125      | -0,761 |
| $\delta$ , %                                       | 21,544  | 6,695     | 0,396           | 0,939            | 0,557                | 1,000        | 0,754      | -0,578 |
| $\Psi$ , %                                         | 17,958  | 5,545     | 0,365           | 0,563            | 0,125                | 0,754        | 1,000      | -0,451 |
| НВ                                                 | 275,500 | 15,097    | -0,872          | -0,580           | -0,761               | -0,578       | -0,451     | 1,000  |
| Отмеченные корреляции значимы на уровне $p < 0,05$ |         |           |                 |                  |                      |              |            |        |

Таблица 3.15 – Корреляции для образцов, вырезанных в продольном направлении

| Переменная                                         | Среднее | Ср. откл. | Мощность, Р, Вт | $\sigma_b$ , МПа | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\delta$ , % | $\Psi$ , % | НВ     |
|----------------------------------------------------|---------|-----------|-----------------|------------------|----------------------|--------------|------------|--------|
| Мощность, Р, Вт                                    | 1700    | 351,468   | 1,000           | 0,502            | 0,482                | -0,908       | -0,512     | -0,936 |
| $\sigma_b$ , МПа                                   | 972,530 | 24,709    | 0,502           | 1,000            | 0,831                | -0,363       | 0,396      | -0,552 |
| $\sigma_{0,2}$ , МПа                               | 601,103 | 30,510    | 0,482           | 0,831            | 1,000                | -0,217       | 0,400      | -0,537 |
| $\delta$ , %                                       | 27,314  | 4,121     | -0,908          | -0,363           | -0,217               | 1,000        | 0,624      | 0,851  |
| $\Psi$ , %                                         | 24,772  | 8,572     | -0,511          | 0,396            | 0,400                | 0,624        | 1,000      | 0,450  |
| НВ                                                 | 270,167 | 17,365    | -0,936          | -0,552           | -0,537               | 0,851        | 0,450      | 1,000  |
| Отмеченные корреляции значимы на уровне $p < 0,05$ |         |           |                 |                  |                      |              |            |        |

Корреляционный анализ выявил более устойчивую связь механических параметров (откликов) с независимыми переменными (мощностью) для образцов, вырезанных в продольном направлении сплавления. Снижение общей вариабельности и повышение стабильности откликов связано с проведенной ТО и снижением деструктивного влияния остаточных напряжений.



### 3.4.4 Непараметрический анализ для образцов после термической обработки

Непараметрический анализ проводился по 2-м группам в разрезе оценки влияния направления выращивания на отклики (характеристики механических свойств). Результаты представлены в виде диаграмм размаха (рисунок 3.26-3.30).

Данные непараметрического анализа хорошо согласуются с результатами корреляционного анализа относительно влияния остаточных напряжений на вариабельность откликов. Наиболее явные различия по откликам в группах наблюдаются для предела прочности и относительного удлинения.

Регрессионные модели влияния мощности лазерного излучения на механические свойства для образцов после ТО, вырезанных в продольном и поперечном направлении, выглядят следующим образом:

$$\sigma_{в, np} = 799 + 0,191 \cdot P - 0,48 \cdot 10^{-4} \cdot P^2;$$

$$\sigma_{в, n} = -2408 + 3,95 \cdot P - 1,43 \cdot 10^{-3} \cdot P^2 + 0,152 \cdot 10^{-6} \cdot P^3;$$

$$\delta_{np} = -160 + 0,359 \cdot P - 0,22 \cdot 10^{-3} \cdot P^2 + 0,411 \cdot 10^{-7} \cdot P^3;$$

$$\delta_n = 421 - 0,727 \cdot P + 0,431 \cdot 10^{-3} \cdot P^2 - 0,83 \cdot 10^{-7} \cdot P^3;$$

$$HB_{np} = -69,8 + 0,764 \cdot P - 0,510 \cdot 10^{-3} \cdot P^2 + 0,104 \cdot 10^{-6} \cdot P^3;$$

$$HB_n = -448 + 1,43 \cdot P - 0,89 \cdot 10^{-3} \cdot P^2 + 0,175 \cdot 10^{-6} \cdot P^3.$$

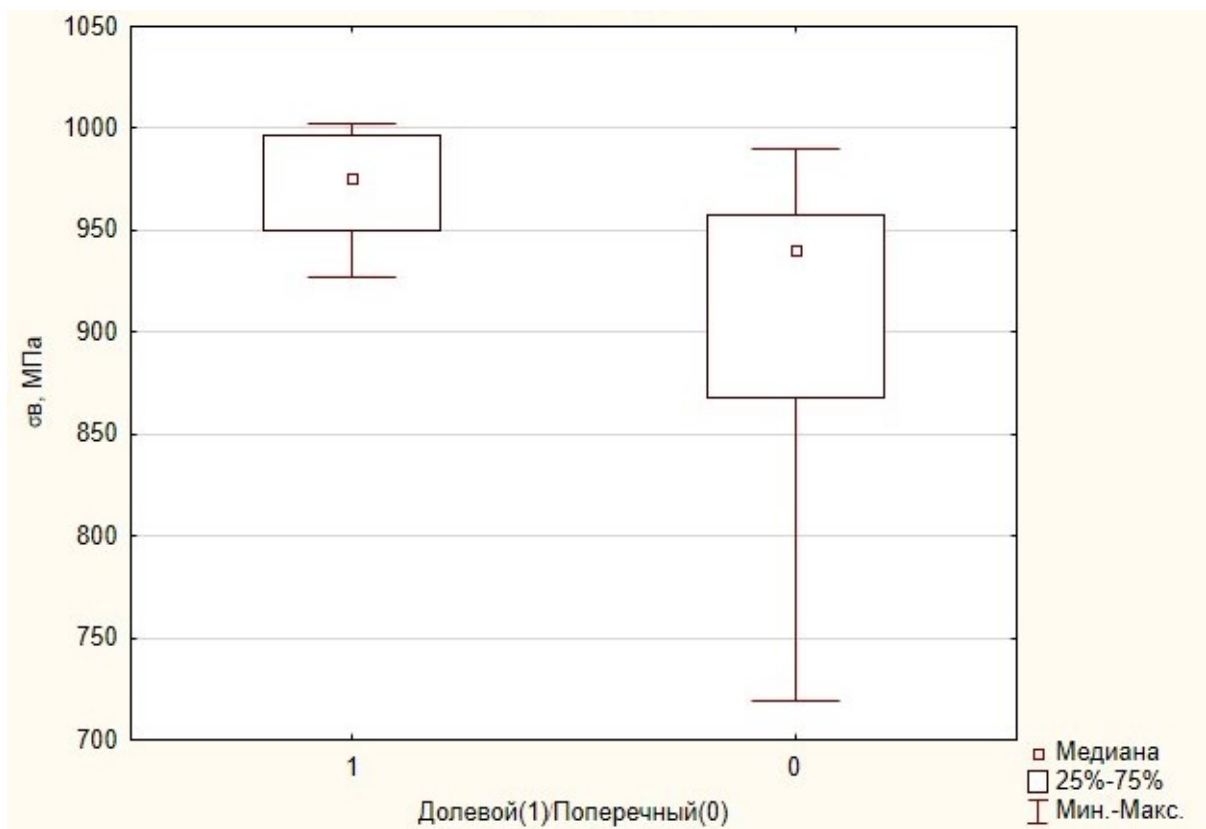


Рисунок 3.26 – Диаграмма размаха по группам  $\sigma_{в}$ , МПа, образцов после ТО

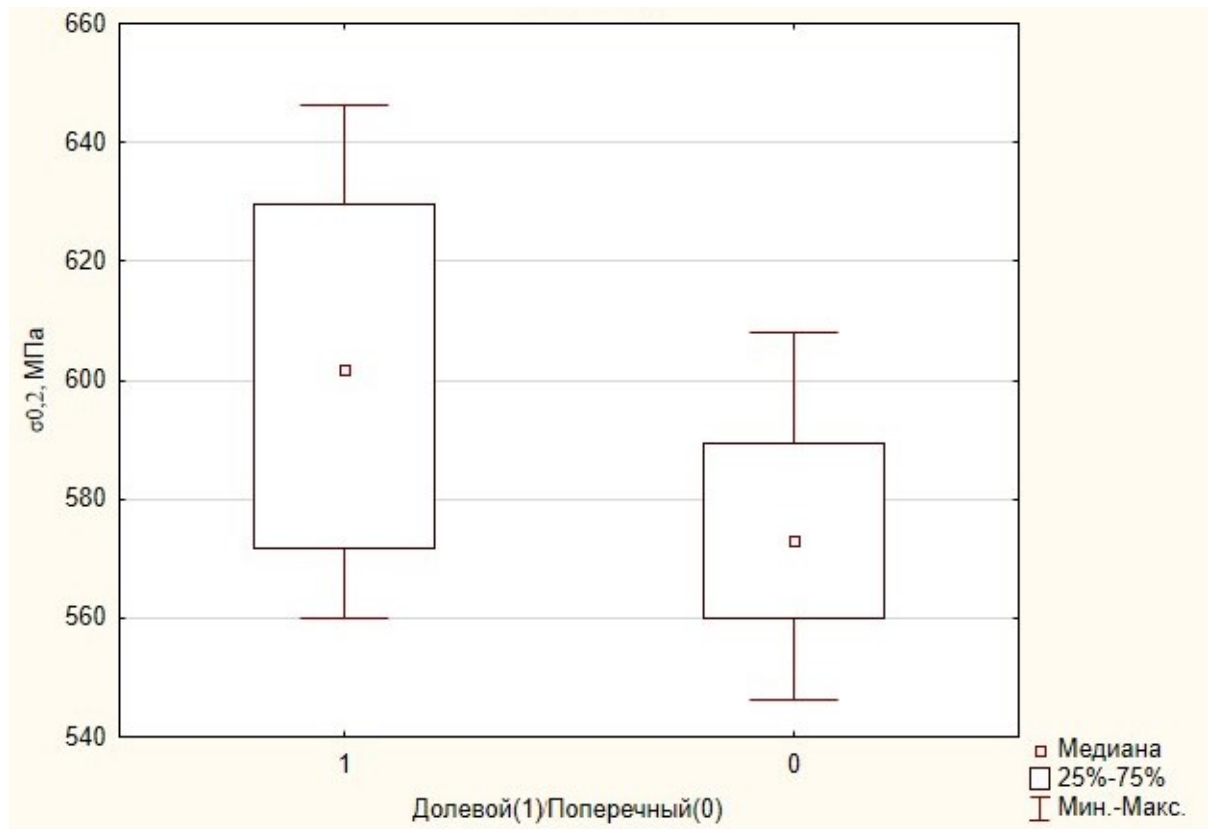


Рисунок 3.27 – Диаграмма размаха по группам  $\sigma_{0.2}$ , МПа, образцов после ТО

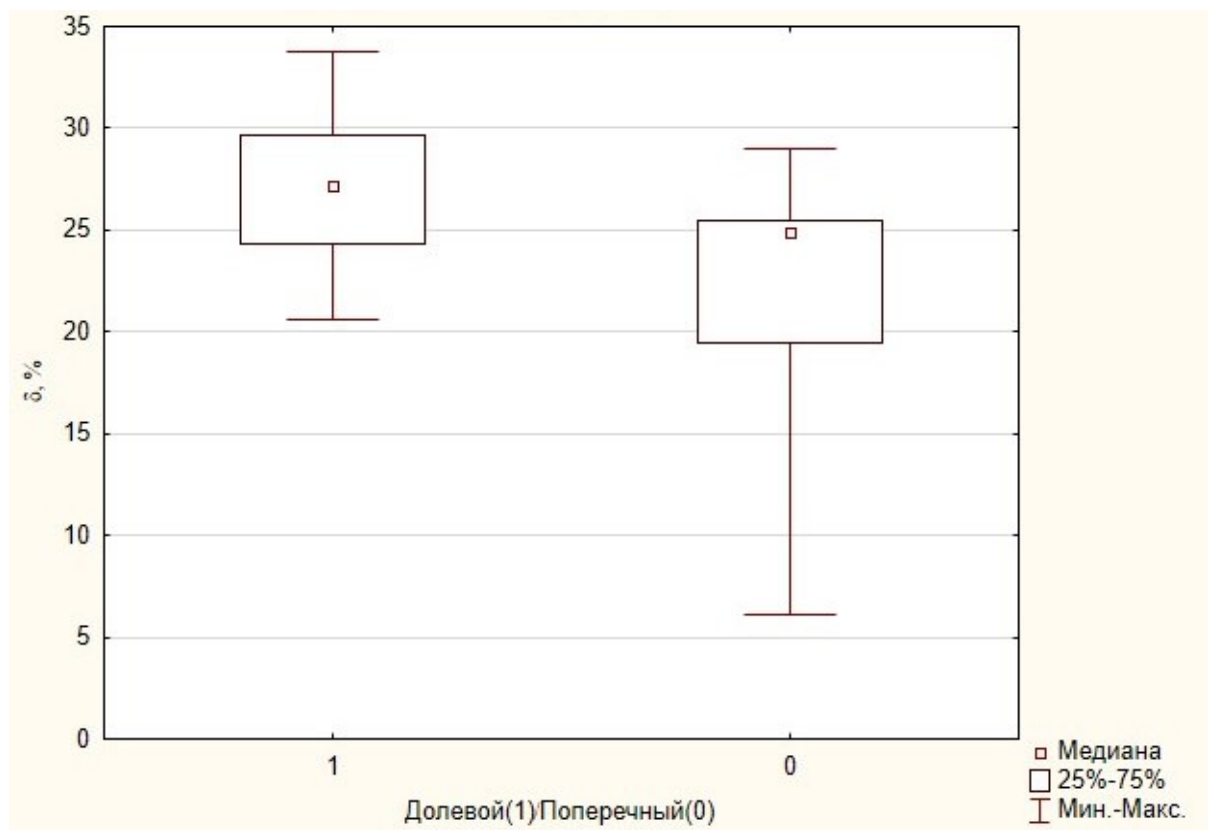


Рисунок 3.28 – Диаграмма размаха по группам  $\delta$ , %, образцов после ТО

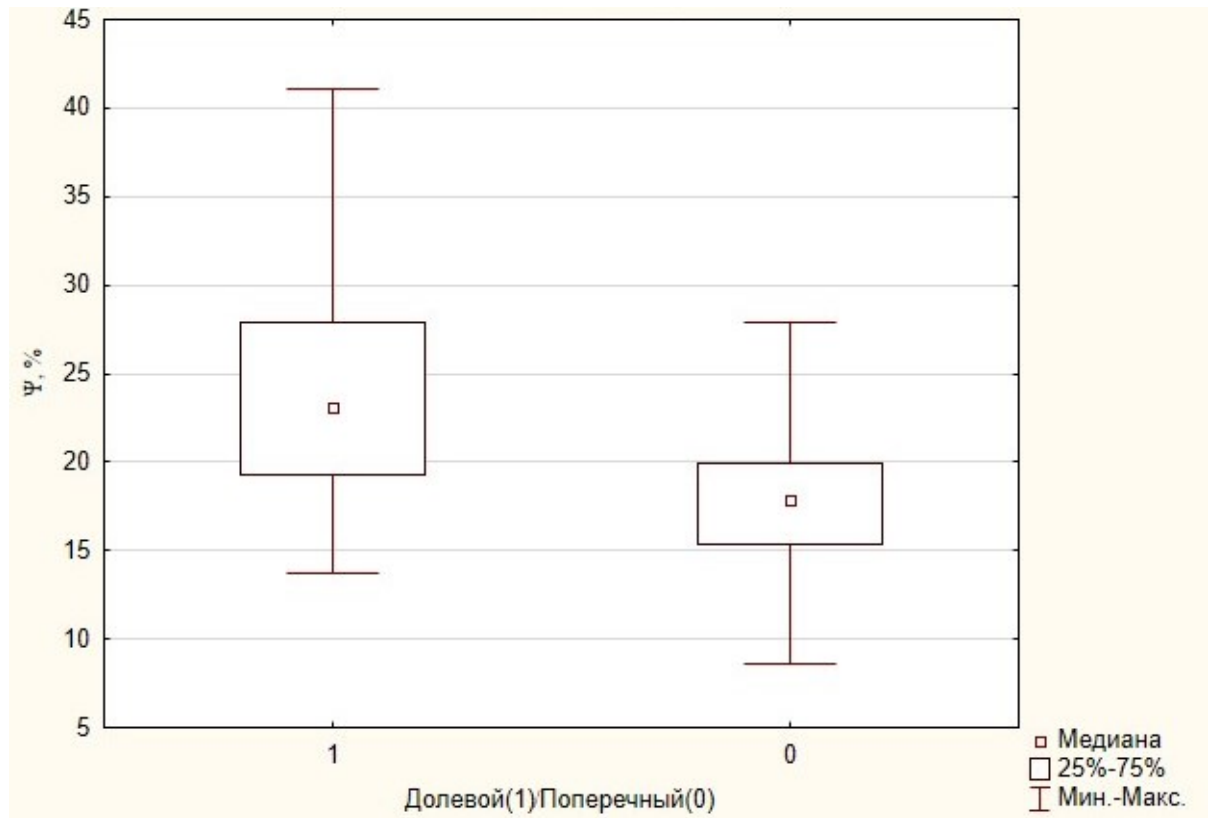
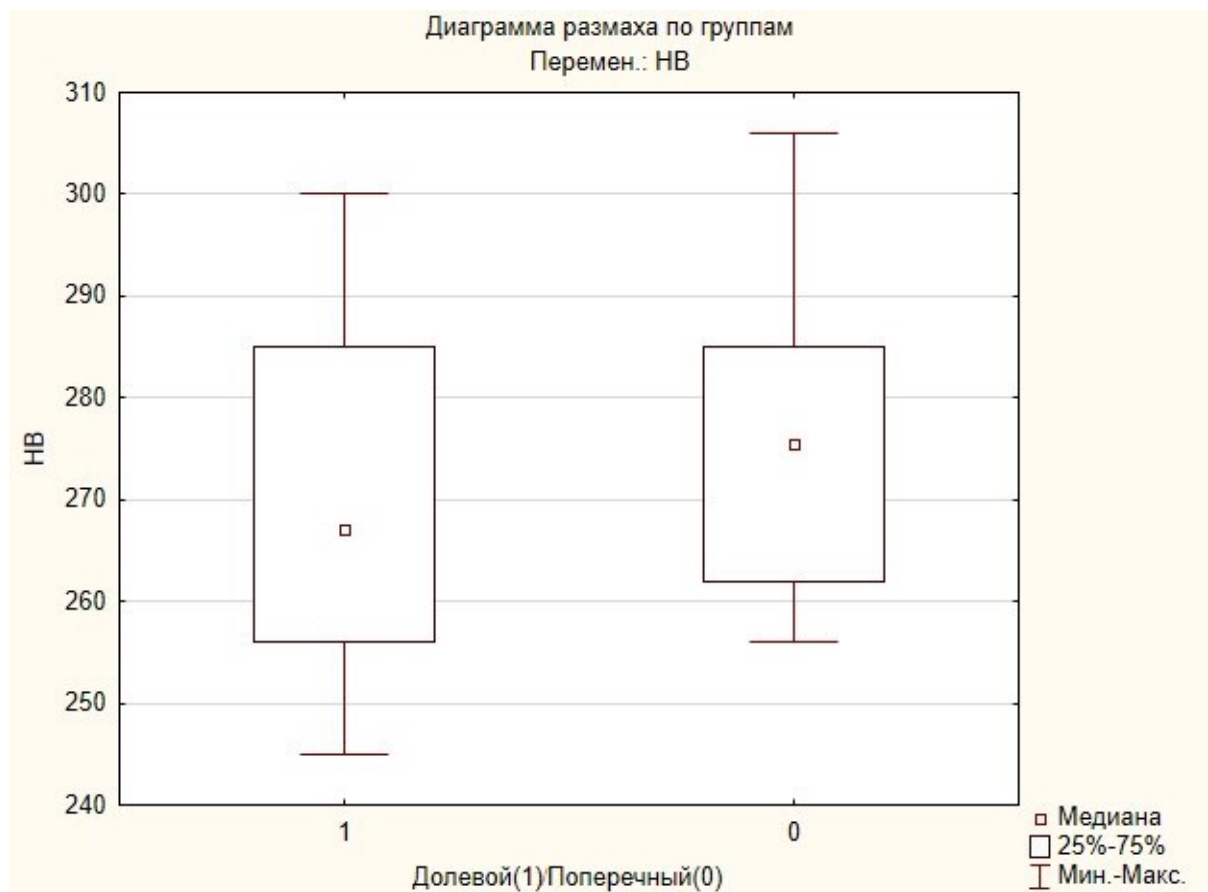
Рисунок 3.29 – Диаграмма размаха по группам  $\psi, \%$ ,

Рисунок 3.30 – Диаграмма размаха по группам НВ, образцов после ТО

Графические интерпретации регрессионных моделей влияния мощности лазерного излучения на механические свойства для образцов после ТО, представлены на рисунках 3.31-3.36. Полученные регрессионные модели используются для выбора рационального значения мощности лазерного излучения при назначении технологических параметров процесса ПЛВ.

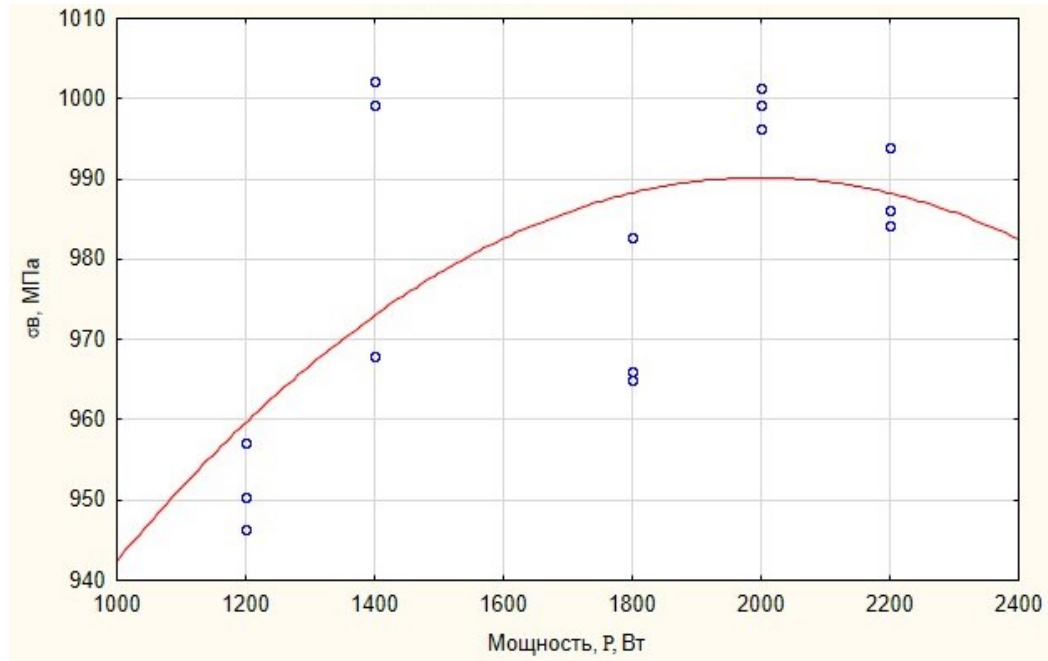


Рисунок 3.31 – График зависимости предела прочности образцов после ТО, вырезанных в продольном направлении, от мощности лазерного излучения

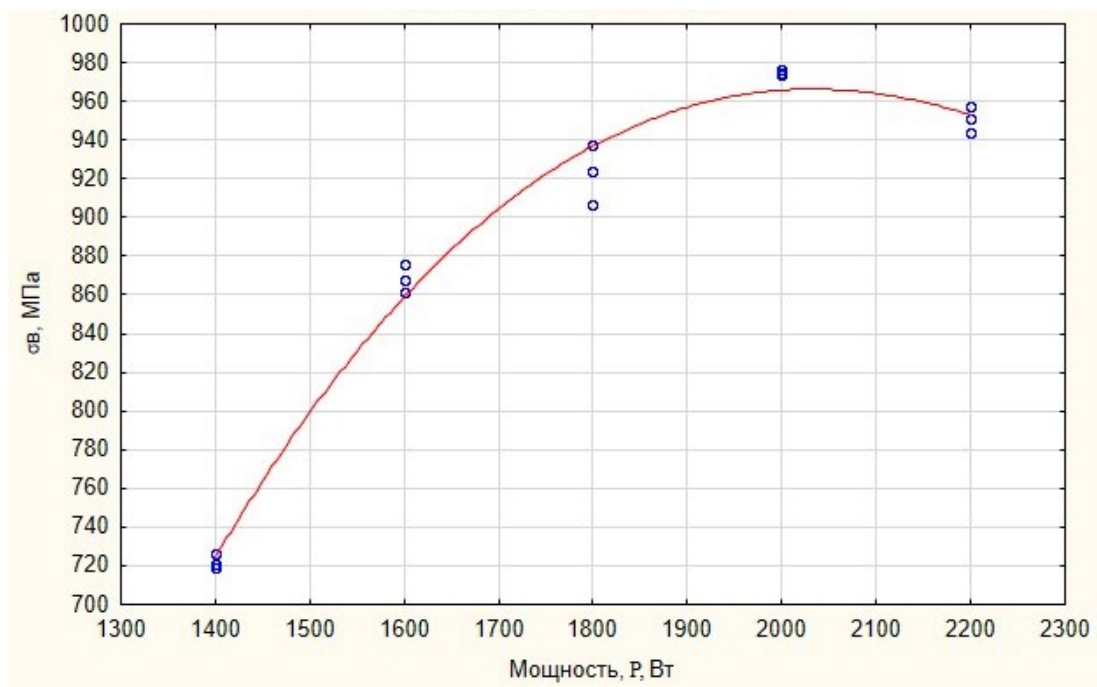


Рисунок 3.32 – График зависимости предела прочности образцов после ТО, вырезанных в поперечном направлении, от мощности лазерного излучения

С увеличением мощности лазерного излучения до 2000 Вт (рисунок 3.31) происходит увеличение значения временного сопротивления на разрыв, при дальнейшем увеличении лазерного излучения до 2200 Вт наблюдается снижение предела прочности. Анализ зависимостей механических характеристик от мощности излучения  $P$  показывает, что рациональные значения мощности лазерного излучения локализуется в области  $P=2000$  Вт.

Характер кривой (рисунок 3.32) аналогичен для зависимости предела прочности образцов после ТО, вырезанных в продольном направлении (рисунок 3.31). Значения временного сопротивления возрастают с увеличением мощности лазерного излучения до 2000 Вт, а затем начинает снижаться. Анализ того, как предел прочности зависит от мощности излучения  $P$ , показал, что рациональные значения мощности находятся в диапазоне  $P = 2000$  Вт.

Анализ кривой на рисунке 3.33 показывает, что при мощности лазерного излучения 1400 Вт относительное удлинение имеет наибольшие значения, до мощности 2200 Вт происходит снижение значений относительного удлинения.

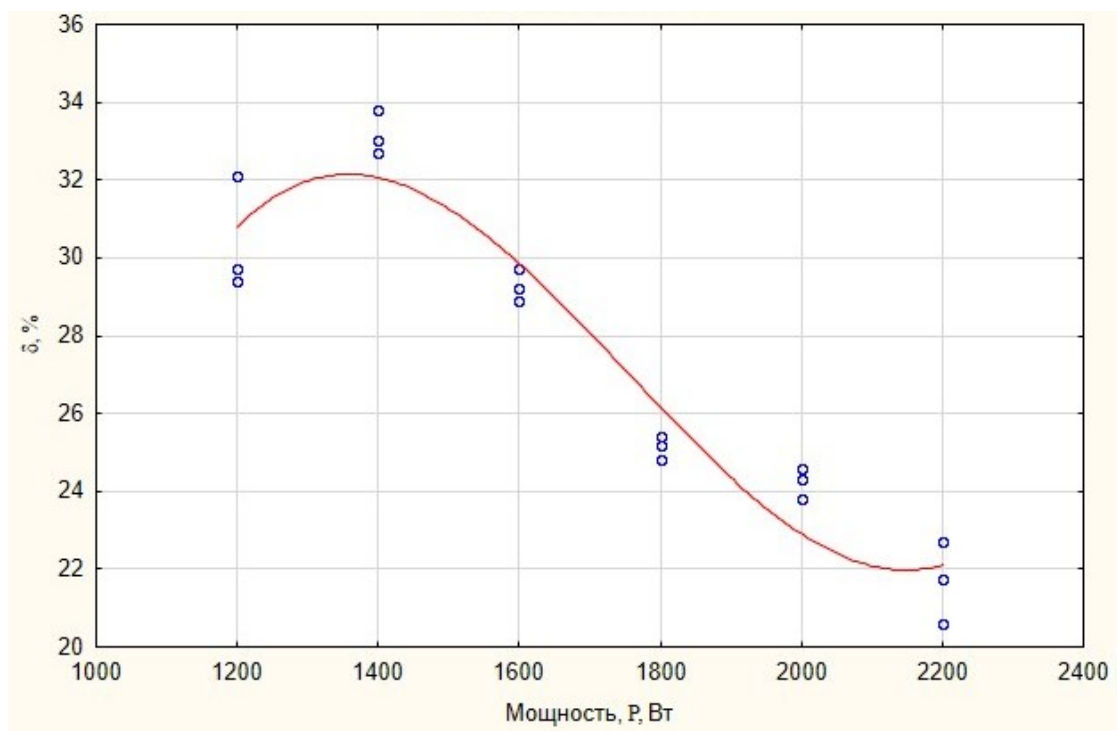


Рисунок 3.33 – График зависимости относительного удлинения образцов после ТО, вырезанных в продольном направлении, от мощности лазерного излучения

Волнообразный характер кривой на графике (рисунок 3.34) можно объяснить наличием в структуре образцов не сплавленных порошинок, а также трещин и направлением выращивания образцов. Термическая обработка синтезированного материала способствует снижению остаточных напряжений, но также она увеличивает и трещины, образовавшиеся при выращивании материала.

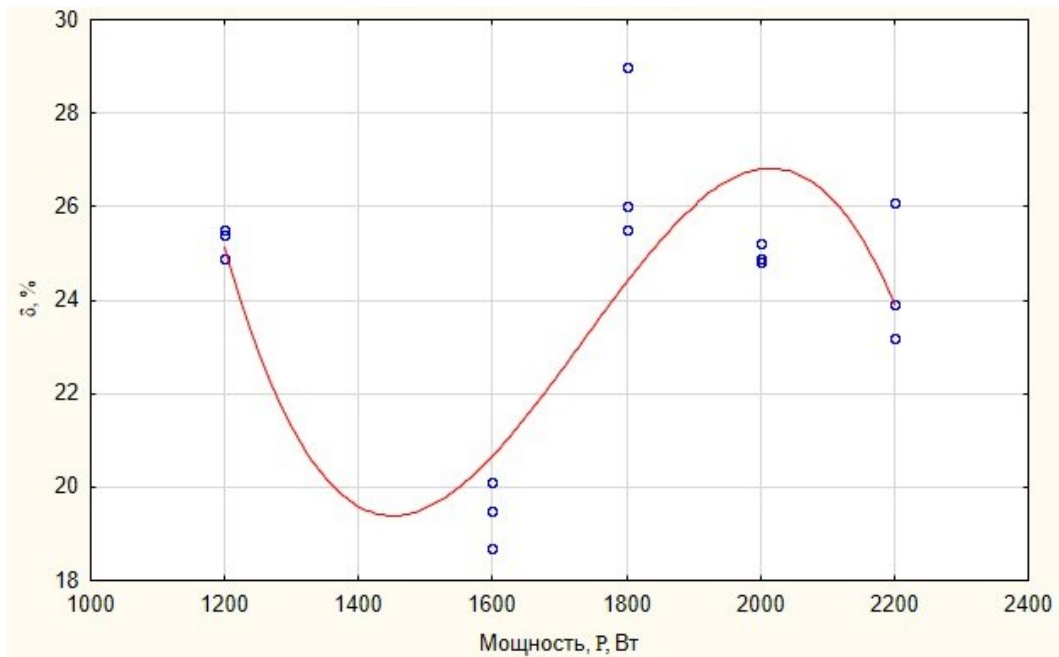


Рисунок 3.34 – График зависимости относительного удлинения образцов после ТО, вырезанных в поперечном направлении, от мощности лазерного излучения

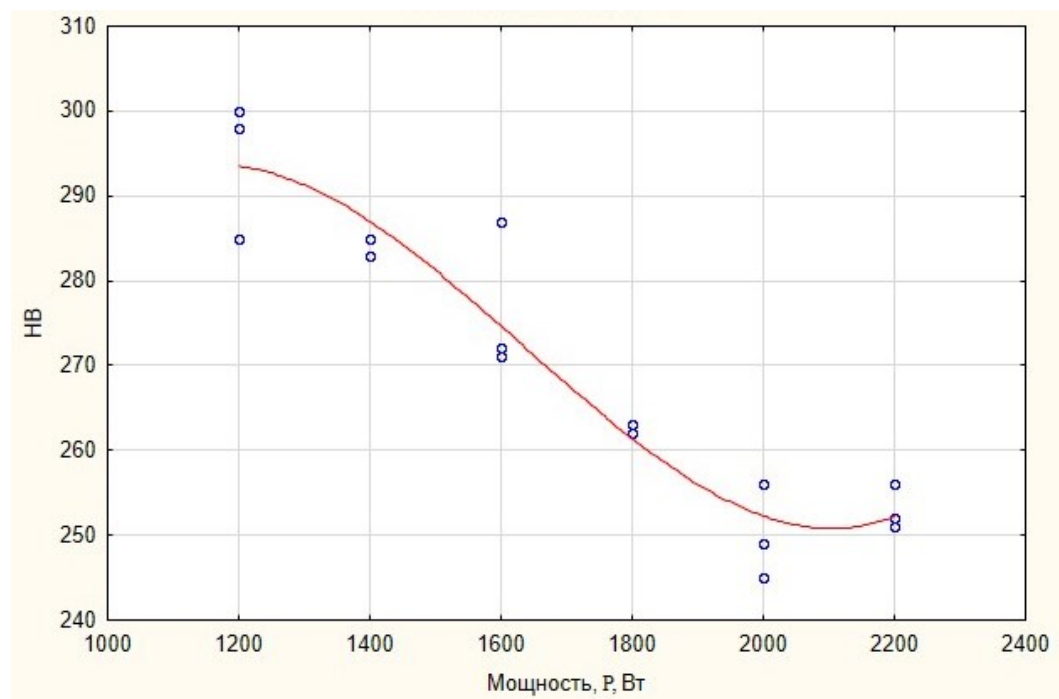


Рисунок 3.35 – График зависимости твердости по Бринеллю образцов после ТО, вырезанных в продольном направлении, от мощности лазерного излучения

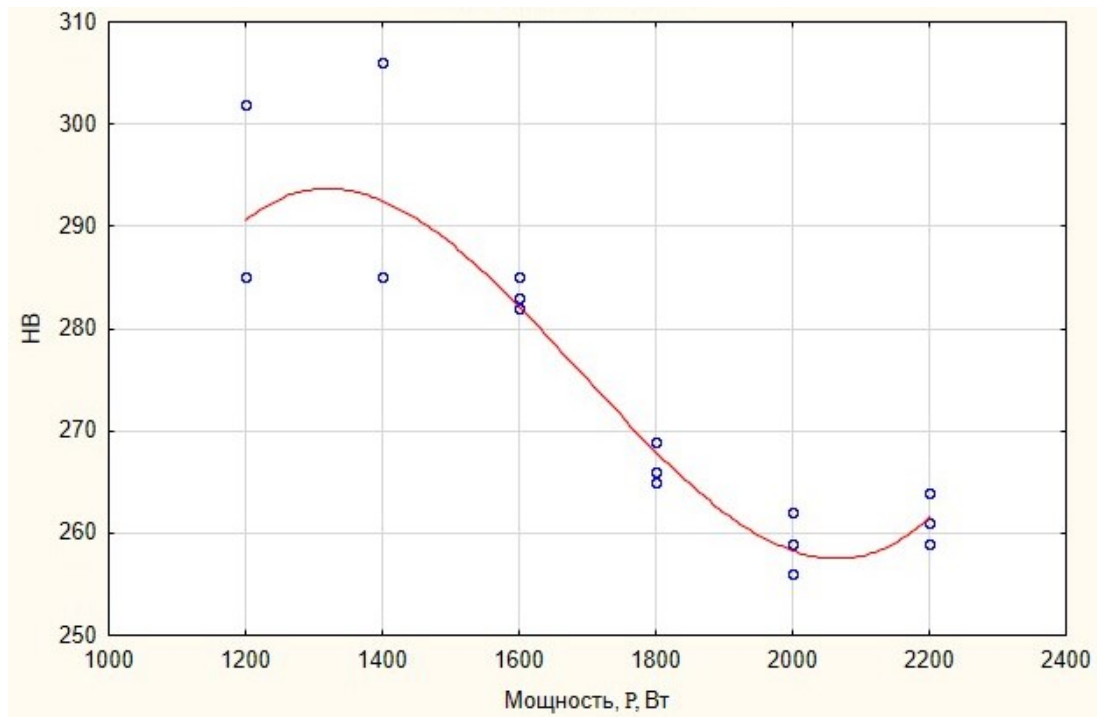


Рисунок 3.36 – График зависимости твердости по Бринеллю образцов после ТО, вырезанных в поперечном направлении, от мощности лазерного излучения

При мощности лазерного излучения 1200 Вт твердость по Бринеллю HB имеет наибольшие значения как для образцов, вырезанных в поперечном, так и в продольном направлении (рисунки 3.35 и 3.36), при мощности 2000 Вт – наименьшие значения HB, при увеличении величины лазерного излучения до 2200 Вт наблюдается незначительный рост значений HB.

Адекватность моделирования оценивалась по коэффициенту детерминации  $R$  (доля объясненных моделью дисперсий). Значения коэффициентов  $R$  представлены в таблице 3.16. Коэффициенты детерминации говорят о хорошем соответствии модели результатам численного эксперимента.

Таблица 3.16 – Оценка адекватности регрессионных моделей

| Направление выращивания | Предел прочности | Относительное удлинение | Твердость по Бринеллю |
|-------------------------|------------------|-------------------------|-----------------------|
| Продольное              | $R = 0,629$      | $R = 0,961$             | $R = 0,957$           |
| Поперечное              | $R = 0,992$      | $R = 0,754$             | $R = 0,927$           |

### **3.5 Исследование влияния технологических режимов термической обработки на формирование структуры и механических свойства крупногабаритных заготовок деталей авиационных ГТД из жаропрочного сплава ЭП648**

Аддитивное производство изделий позволяет контролировать энергетическое воздействие на микрообъем сплава, что приводит к получению материала с более высокими рабочими характеристиками по сравнению с отливками. Однако применение никелевых материалов в аддитивных технологиях ограничено процессами сверхбыстрой кристаллизации, которые приводят к накоплению внутренних напряжений и образованию дефектов микро- и макроструктуры. Для снижения уровня остаточных напряжений в изделиях после ПЛВ рекомендуется проводить термическую обработку, однако рациональные режимы такой обработки заготовок чётко не установлены. С другой стороны, термическая обработка подразумевает получение высоких показателей механических свойств. В публикациях [167-170] есть информация по поиску рациональных режимов термообработки для литых или деформированных изделий из никелевых жаропрочных сплавов. Для изделий, изготовленных аддитивными методами наплавки МПК, похожие рекомендации имеют значительно меньший объём.

Место термической обработки в общем цикле изготовления деталей устанавливается в зависимости от требований к свойствам изделия. В большинстве случаев термическая обработка проводится после механической постобработки [162, 163]. Это связано с требованиями высокой прочности, твёрдости и износостойкости материала изделия. Если заготовка должна обладать высокой вязкостью и низкой прочностью перед интенсивной механической постобработкой или правкой, то термическая обработка проводится до механической обработки. Такая последовательность операций позволяет снизить количество дефектов различной морфологии и обеспечить высокое качество изделия.

Критериями оценки результатов термической обработки являются достижение требуемой твердости, уровня остаточных напряжений, микроструктуры. Для установления уровня остаточных напряжений предлагаются различные способы: расчётный, механический, физический, рентгеноструктурный.



Методы Г. Закса [171] и Н.Н. Давиденкова [172] имеют наибольшее практическое применение среди механических методов получения остаточных напряжений. Метод Г. Закса включает послойное растачивание или обтачивание цилиндра с измерением окружной и осевой деформации на внешнем или внутреннем радиусе изделий. Он позволяет определять окружные, радиальные и осевые остаточные напряжения, но является трудоемким и длительным, а также требует высокоточной измерительной техники для учета малых деформаций. В случаях, когда необходимо только определить окружные остаточные напряжения, применяют метод Н.Н. Давиденкова, который заключается в разрезке цилиндра вдоль образующей и измерении его срединного диаметра, без последующего послойного удаления металла с внутренней поверхности [172, 173].

Выбор режимов термообработки проводился на основе анализа существующих, установленных и прогнозируемых зависимостей между свойствами материала и изменениями его микроструктуры, их экспериментального апробирования. Выполнены исследования, в которых варьировались температура термообработки и время выдержки. Известны режимы термической обработки жаропрочных сплавов на никелевой основе, которые включают закалку, обеспечивающую полное растворение упрочняющей  $\gamma'$ -фазы и рекристаллизацию структуры, а также один или два этапа старения с изотермической выдержкой в области температур, образования  $\gamma'$ -фазы. Например, в патенте Японии № 592/1560 представлен режим термообработки, заключающийся в закалке при температуре 970-1010°C и последующем охлаждении на воздухе, а затем старении при 621-718°C, а в патенте Японии №62297446 описывается режим, который включает закалку при 1065-1165°C и старение при 700-730°C. Однако использование вышеупомянутых режимов термической обработки не обеспечивает термически стабильную структуру сплава, что необходимо для эффективной и надежной работы деталей авиационных ГТД. Из литературных источников следует, что основная масса упрочняющей  $\gamma'$ -фазы выделяется в интервале температур от 650 до 980°C и не может достаточно полно образовываться за счет изотермической выдержки в узком интервале температур. Если детали прошли термическую

обработку в узком интервале температур, это может привести к последующей термической обработке (старению) в процессе эксплуатации, а также к частичному растворению мелкодисперсных частиц  $\gamma'$ -фазы и выгоранию легирующих элементов, что изменит механические и физические свойства материала и снизит работоспособность детали.

Для жаропрочного сплава ЭП648 (ВХ4А) и его литейной модификации ВХ4Л технические условия [174] определяют режим термической обработки, который включает отжиг при 900°C в течение 10-16 часов и закалку на воздухе с температуры 1180°C [175]. Большой опыт использования сплава ЭП648 в авиационном двигателестроении показал, что сплав обладает высокими показателями прочности, пластичности и свариваемости, но его использование имеет и несколько серьезных недостатков, которые ограничивают ресурс изделий. Высокое содержание хрома не обеспечивает существенного повышения жаростойкости при температурах выше 1000°C по сравнению со сплавами, содержание хрома в которых составляет 20-25%. Кроме того, избыточные фазы на основе хрома, которые упрочняют сплав, подвержены вырождению в игольчатую или пластинчатую структуру в процессе наработки. Из-за нестабильности твердого раствора сплав также подвержен выделению нежелательных фаз ( $\sigma$ ,  $\mu$  и Лавеса) низкопластичной морфологии в процессе эксплуатации, что приводит к резкому падению механических свойств, в первую очередь пластичности и жаропрочности, что может вызвать разрушение изделия в процессе эксплуатации.

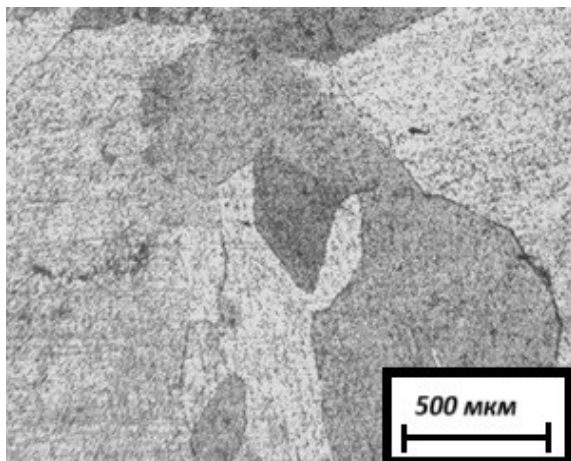
С целью изучения изменения микроструктуры и твердости образцов из жаропрочного сплава ЭП648, полученного методом ПЛВ, в процессе термообработки, проводили исследование выше указанных параметров, после каждого этапа термической обработки для режимов, указанных в качестве рекомендованных в нормативно-справочной литературе [135,174, 176] и патентах [177, 178] представлены в таблице 3.15.

Таблица 3.15 – Режимы термической обработки жаропрочного сплава ЭП648

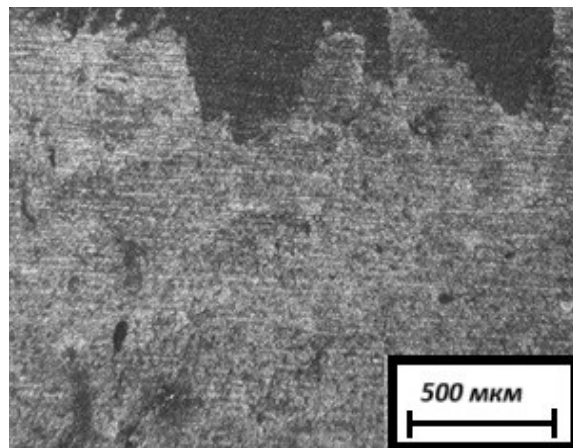
| № режима | Режим термической обработки                                                                                                                                                                                                                                            |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| I        | 1180°C±10°C, выдержка 4 час, охлаждение на воздухе;<br>1000°C±10°C, выдержка 5 час, охлаждение на воздухе;<br>850°C±10°C, выдержка 10 час, охлаждение на воздухе;<br>750°C±10°C, выдержка 20 час, охлаждение на воздухе.                                               |
| II       | 1100°C±10°C, выдержка 4 час, охлаждение на воздухе;<br>950°C±10°C, выдержка 3,5 час, охлаждение на воздухе;<br>800°C±10°C, выдержка 7,5 час, охлаждение на воздухе;<br>700°C, выдержка 14 час, охлаждение на воздухе.                                                  |
| III      | 1050°C±10°C, выдержка 4 час, охлаждение на воздухе;<br>900°C±10°C, выдержка 2 час, охлаждение на воздухе;<br>750°C±10°C, выдержка 5 час, охлаждение на воздухе;<br>650°C±10°C, выдержка 8 час, охлаждение на воздухе.                                                  |
| IV       | 1000°C±10°C, выдержка 4 час;<br>охлаждение с печью до 900°C±10°C, выдержка 40 мин.;<br>охлаждение с печью до 800°C±10°C, выдержка 90 мин.;<br>охлаждение с печью до 700°C±10°C, выдержка 5 час;<br>охлаждение с печью до 600°C±10°C, выдержка 7 час, далее на воздухе. |
| V        | 1180°C±10°C, выдержка 4 час, охлаждение на воздухе;<br>900°C±10°C, выдержка 16 час, охлаждение на воздухе.                                                                                                                                                             |
| VI       | 1140°C±10°C, выдержка 1 час, охлаждение на воздухе;<br>900°C±20°C, выдержка 16 час, охлаждение на воздухе.                                                                                                                                                             |

Микроструктура образцов после термообработки по режимам из таблицы 3.15 представленных на рисунке 3.37. Результаты измерения твердости приведены в таблице 3.16.

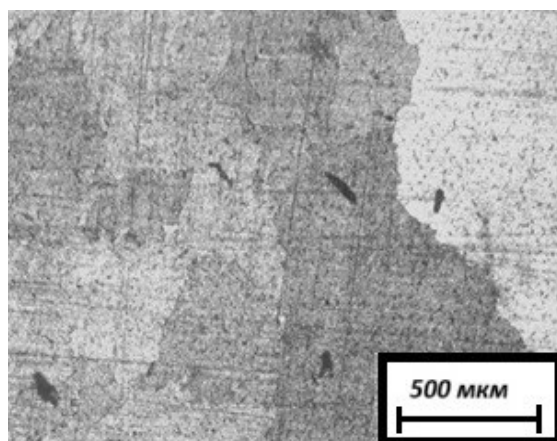
Анализ микроструктуры показывает, что в изделии после всех видов термообработки формируется разнотермичность, утрачивается слоистая структура, характерная для наплавленных частиц. В образцах, прошедших термическую обработку по режимам I, II, III и VI в структуре зёрен, наблюдаются выделения избыточных фаз. В микроструктуре образцов после термообработки по режимам IV и V наблюдаются структуры, характерные для упорядоченных твёрдых растворов на основе никеля – видно чередование фаз крестообразной формы.



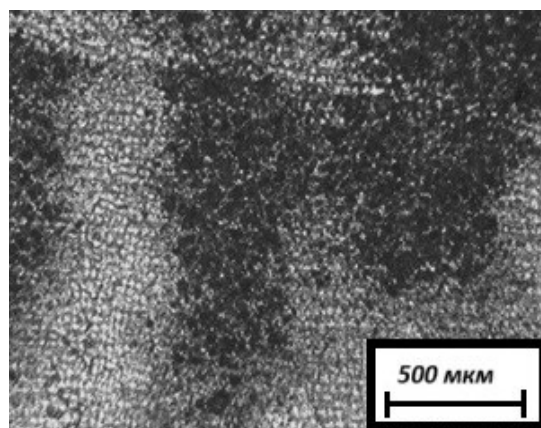
Режим I



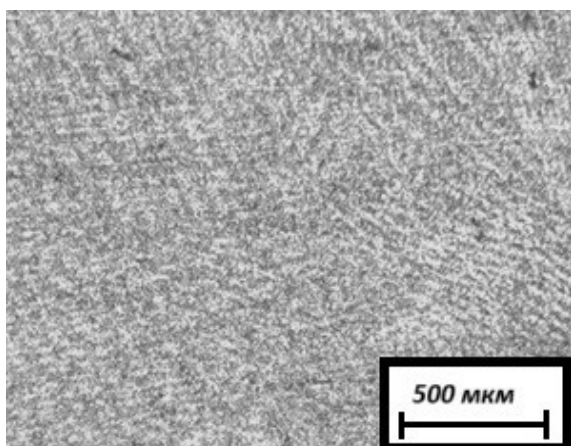
Режим II



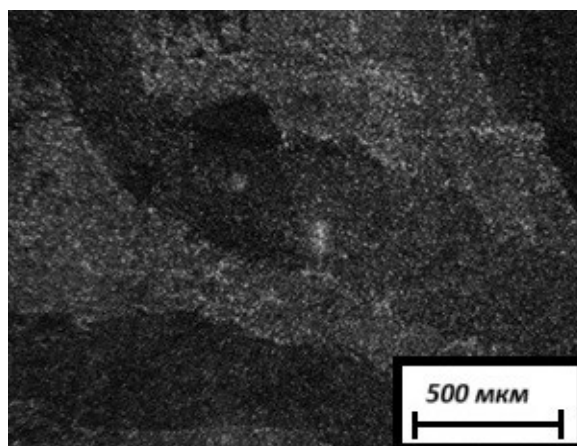
Режим III



Режим IV



Режим V



Режим VI

Рисунок 3.37 – Микроструктура образцов после термообработки, х366

Таблица 3.16 – Результаты измерения твердости образцов по Бринеллю

| № режима | Режим ТО                             | Твердость, НВ |
|----------|--------------------------------------|---------------|
| 0        | Исходный образец                     | 191±1         |
| 1        | 1180 °С, 4 ч, воздух                 | 135±1         |
|          | 1000 °С, 5 ч, воздух                 | 167±22        |
|          | 850 °С, 10 ч, воздух                 | 249±2         |
|          | 750 °С, 20 ч, воздух                 | 254±4         |
| 2        | 1100 °С, 4 ч, воздух                 | 130±18        |
|          | 950 °С, 3,5 ч, воздух                | 163±17        |
|          | 800 °С, 7,5 ч, воздух                | 247±9         |
|          | 700 °С, 14 ч, воздух                 | 311±8         |
| 3        | 1050 °С, 4 ч, воздух                 | 144±20        |
|          | 900 °С, 2 ч, воздух                  | 194±12        |
|          | 750 °С, 5 ч, воздух                  | 222±24        |
|          | 650 °С, 8 ч, воздух                  | 230±19        |
| 4        | 1000 °С, 4ч                          | 143±17        |
|          | с печью до 900 °С, 40 мин.           | 167±5         |
|          | с печью до 800 °С, 1,5 ч             | 225±29        |
|          | с печью до 700 °С, 5 ч               | 191±39        |
|          | с печью до 600 °С, 7 ч, далее воздух | 216±50        |
|          | 600 °С, 7 ч, печь                    | 191±7         |
| 5        | 1180 °С, 4 ч, печь                   | 129±1         |
|          | 900 °С, 16 ч, печь                   | 229±29        |
|          | 1180 °С, 4 ч, воздух                 | 136±2         |
|          | 900 °С, 16 ч, воздух                 | 236±29        |
| 6        | 1140 °С, 4 ч, печь                   | 128±1         |
|          | 900 °С, 16 ч, печь                   | 192±27        |
|          | 1140 °С, 4 ч, воздух                 | 134±2         |
|          | 900 °С, 16 ч, воздух                 | 199±3         |

Анализ результатов измерения твердости образцов по Бринеллю, представленных в таблице 3.16, показывает:

1) Охлаждение образцов с печью (режимы №№ 4, 5, 6) приводит к получению на 7-10% меньшей твёрдости по сравнению с охлаждением на воздухе (режимы 1, 2, 3), так как охлаждение с печью приводит к более равномерному распределению фаз в материале по сравнению с более быстрым охлаждением на воздухе.

2) Наибольшая твердость НВ 311±8 достигается при применении режима термообработки №2, это объясняется образованием в микроструктуре образца упрочняющей  $\gamma$ -фазы и дополнительных некогерентных фаз, таких как  $\gamma'$ -фаза ( $\text{Ni}_3\text{Ti}$ ), Cr-фаза ( $\text{FeCr}$ ) и карбидов ( $\text{Me}_{23}\text{C}_6$  и  $\text{Me}_6\text{C}$ ).

3) Наименьшая твердость НВ  $128 \pm 1$  была достигнута после нагрева до  $1140^\circ\text{C}$ , выдержки 4 ч, охлаждения с печью, это можно объяснить рекристаллизацией структуры, более равномерному распределению фаз и растворением упрочняющей  $\gamma'$ -фазы.

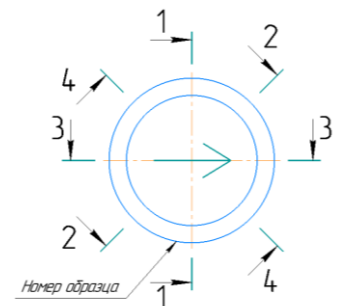
Для изучения внутренних остаточных напряжений, образующихся в процессе ПЛВ были изготовлены кольцевые образцы из жаропрочного сплава ЭП648. Произведена термическая обработка, выбор режимов термообработки обусловлен наиболее частым их использованием на предприятиях авиационного двигателестроения, режимы представлены в таблице 3.17, внешний вид образцов представлен на рисунке 3.38.

Таблица 3.17 – Режимы термообработки колец

| № образца | Режим термообработки           |            |
|-----------|--------------------------------|------------|
|           | Термообработка                 | Охлаждение |
| 1         | $1180^\circ\text{C}$ , 4 часа  | На воздухе |
| 2         | $1180^\circ\text{C}$ , 4 часа  | На воздухе |
|           | $900^\circ\text{C}$ , 16 часов |            |
| 3         | $1180^\circ\text{C}$ , 4 часа  | С печью    |
|           | $900^\circ\text{C}$ , 16 часов |            |
| 4         | $1180^\circ\text{C}$ , 4 часа  | С печью    |
| 5         | Без термообработки             |            |



а)



б)

Рисунок 3.38 – Вид образцов для определения остаточных напряжений:  
а) образцы после ПЛВ б) схема измерения образцов

Для исключения внесения дополнительных напряжений отрезка колец от платформы построения и последующая разрезка колец осуществлялась с использованием электроэрозионной обработки. Перед и после отрезки от платформы построения кольцевые образцы были измерены, схема измерения представлена на рисунке 3.38, б.

После проведения термообработки и разрезки кольца были измерены в соответствии со схемой, представленной на рисунке 3.39. Разрезка осуществлялась с помощью проволоки диаметром 0,25 мм. Критериями оценки величины остаточных напряжений являлись значения  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $d_1$  и  $d_2$ .

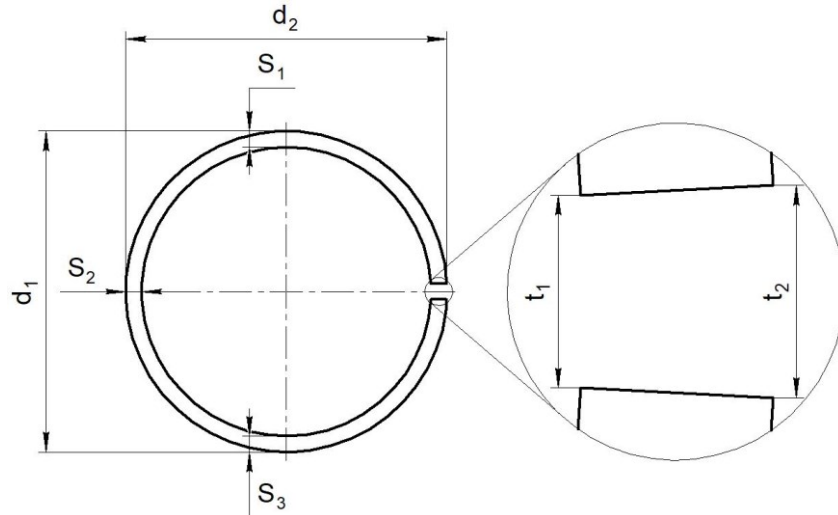


Рисунок 3.39 – Схема измерения образца после разрезания

Измерение параметров  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $d_1$  и  $d_2$  проводилось на инструментальном микроскопе БМИ-1. Результаты измерения кольцевых образцов после ПЛВ и термической обработки представлены в таблице 3.18. Результаты измерений колец после разрезки приведены в таблице 3.19.

Таблица 3.18 – Результаты измерения цилиндрических образцов после ПЛВ

| Образец      | 1         | 2         | 3        | 4         | 5         |
|--------------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|
| На платформе |           |           |          |           |           |
| Ø наружный   | 50,3±0,1  | 50,3±0,3  | 50,4±0,1 | 50,5±0,08 | 50,4±0,1  |
| Стенка       | 5,95±0,1  | 5,93±0,1  | 6,0±0,17 | 6,0±0,09  | 5,8±0,1   |
| Отделенные   |           |           |          |           |           |
| Ø наружный   | 50,2±0,1  | 50,4±0,1  | 50,3±0,2 | 50,4±0,08 | 50,15±0,1 |
| Стенка       | 5,95±0,13 | 5,93±0,09 | 6,0±0,1  | 5,95±0,04 | 5,8±0,1   |

Таблица 3.19 – Результаты измерений образцов после разрезки

| № обр. | Режим термообработки                                     | Результаты измерений образцов после разрезки |            |            |            |
|--------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------|------------|------------|------------|
|        |                                                          | $d_1$ , мм                                   | $d_2$ , мм | $t_1$ , мм | $t_2$ , мм |
| 1      | 1180 °С, 4 часа, охлаждение на воздухе                   | 50,6                                         | 50,0       | 0,25       | 0,27       |
| 2      | 1180 °С, 4 часа; 900 °С, 16 часов, охлаждение на воздухе | 50,4                                         | 50,3       | 0,29       | 0,31       |
| 3      | 1180 °С, 4 часа; 900 °С, 16 часов, охлаждение с печью    | 50,0                                         | 50,6       | 0,29       | 0,32       |
| 4      | 1180 °С, 4 часа, охлаждение с печью                      | 50,0                                         | 50,2       | 0,32       | 0,33       |
| 5      | без термообработки                                       | 50,5                                         | 50,4       | 0,71       | 0,80       |

Из результатов измерений видно, что наибольшая величина раскрытия – у образца №5, который не подвергался термической обработке, что свидетельствует о высоком уровне остаточных напряжений в образцах после ПЛВ. Стоит отметить, что у остальных образцов величина раскрытия имеет значительно меньшие значения, что указывает на более низкий уровень остаточных напряжений. Наименьшие значения размеров зазоров в образцах после нагрева до 1180 °С, при выдержке 4 ч, охлаждения на воздухе. Это указывает на то, что термическая обработка снижает уровень остаточных напряжений в кольцевом образце. Анализ способа охлаждения показывает, что охлаждение образцов вместе с печью при одинаковой температуре и продолжительности выдержки приводит к получению большего зазора и, соответственно, остаточных напряжений.

Прямое лазерное выращивание из сплава ЭП648 приводит к получению довольно высокой твёрдости – около 190 НВ. Известно, что выращивание изделий происходит из высоколегированного порошка, полученного путём быстрого охлаждения и имеющего неравновесную структуру, что при нагреве лазерным пучком вызывает структурные изменения, схожие со старением. Термическая обработка выращенных изделий может быть направлена на повышение обрабатываемости резанием и снижение коробления изделий в результате перераспределения остаточных напряжений. В этом случае критерием достижения цели может служить снижение твёрдости.

Результаты представленного исследования показывают, что наиболее экономичным режимом является проведение термообработки, заключающейся в нагреве изделий до 1180 °С, выдержке 4 ч, охлаждения на воздухе, что позволяет снизить твёрдость от  $191 \pm 1$  до  $135 \pm 1$ , а остаточные напряжения не приводят к существенному изменению геометрии. Наименьшие значения твёрдости НВ  $128 \pm 1$  были получены после нагрева до 1140 °С, при выдержке 4 ч, охлаждения с печью. Ускорение охлаждения путём охлаждения на воздухе привело к получению твёрдости НВ  $130 \pm 18$ . С одной стороны, это показывает незначительно более высокие значения твёрдости, но при этом отклонения имеют больший уровень, при этом уровень остаточных напряжений в кольцевых образцах имеют наименьшие



значения, что следует из результатов изменения геометрии образцов в после разрезки.

### **3.6 Исследование влияния величины лазерной расфокусировки на рельеф поверхности при прямом лазерном выращивании**

В диссертационной работе с целью повышения точности и качества заготовок, получаемых в процессе ПЛВ на основе натурального эксперимента исследовано влияние величины расфокусировки лазерного луча на его взаимодействие со струей порошка и перекрытия соседних валиков. Исследован рельеф верхней и боковых поверхностей и раскрыт механизм образования налипших металлических брызг на боковых стенках.

При проведении параллельных опытов выращивались полые квадратные стенки со стороной 50 мм, высотой 12 мм и с толщиной стенки 5 мм. Платформа построения размером 120×120×30 мм, изготовленная из Ст3, была обработана наждачной бумагой и обезжирена ацетоном для удаления масляных пятен.

При изучении влияния величины расфокусировки лазера на качество поверхностей образцов все остальные ключевые параметры процесса ПЛВ, такие как мощность лазера, скорость сканирования и подача порошка, приращение по оси Z и расход защитного и транспортного газа, оставались неизменными. Величина лазерной расфокусировки в каждой серии экспериментов приведена в таблице 3.20.

Траектория движения лазерного луча проходила по контуру каждого слоя. В работах [68] и [80] отмечается, что установка начальной плоскости платформы построения выше точки схождения газопорошкового потока позволяет сохранить стабильность высоты выращивания при многослойном формообразовании заготовок методом ПЛВ.

Таблица 3.20 – Величина расфокусировки лазера

| Номер серии экспериментов          | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    |
|------------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| Величина расфокусировки лазера, мм | -1,5 | -1,0 | -0,5 | +0,5 | +1,0 | +1,5 |
| Расстояние фокусировки, мм         | 9,0  | 9,5  | 10,5 | 11,5 | 12,0 | 12,5 |

Другими словами, начальное эффективное расстояние фокусировки (расстояние между соплом подачи порошка и платформой построения) должно быть меньше длины схождения газопорошкового потока (положения пика массовой концентрации порошка). Поэтому при наплавке первого слоя фокусное расстояние устанавливалось равным 11 мм, т.е. было меньше длины схождения газопорошковой струи, равной 12 мм. Другими словами, поверхность построения изначально находилась над точкой схождения потока порошка, что соответствует отрицательной расфокусировке струи порошка. Причем перед каждым экспериментом осуществлялась проверка и при необходимости регулировка головки с целью обеспечения однородности и сходимости потока порошка, а также проверка соосности между лазерным лучом и потоком порошка.

### ***3.6.1 Определение рельефа поверхности на верхней части образцов***

Аддитивное производство основано на использовании цифровых 3D-моделей заготовок или деталей, позволяющих получить практически идеальную форму. Фактическая высота наплавления готовой заготовки является важной характеристикой поверхности и определяет результат последовательного многослойного наплавления. В данном исследовании для характеристики рельефа верхней поверхности заготовок были предложены такие показатели, как отклонение высоты наплавки и нестабильность высоты наплавки, приведенные в таблице 3.21 и на схеме определения параметров рельефа на верхней поверхности (рисунок 3.40).

При положительном отклонении высоты наплавки средняя высота наплавки больше проектной. А это означает, что имеет место достаточный припуск на последующую механическую обработку. Причем, чем меньше положительное отклонение высоты наплавки, тем больше фактическая высота наплавки одного слоя материала соответствует шагу по оси Z, а чем меньше нестабильность высоты наплавки, тем лучше стабильность процесса ПЛВ от воздействия помех. Таким образом, чем меньше положительное отклонение высоты наплавки и нестабильность высоты наплавки, тем лучше качество формования наплавочного валика в направлении роста.

Таблица 3.21 – Параметры для характеристики рельефа верхней поверхности образцов

| Параметр рельефа поверхности                                                                          | Расчетная формула                                        | Параметры, входящие в расчетную формулу                                                             |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Отклонение от средней высоты наплавки, ( $h_{\text{откл}}$ )                                          | $h_{\text{откл}} = h_a - h_d$                            | $h_a$ – средняя высота наплавки;<br>$h_d$ – заданный размер заготовки                               |
|                                                                                                       | $h_a = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n h_i$                     | $h_i$ – высота наплавки в $i$ -ой точке рельефа верхней поверхности                                 |
| Нестабильность высоты наплавки (полная высота рельефа верхней поверхности), ( $h_{\text{пол. выс}}$ ) | $h_{\text{пол. выс.}} = h_{\text{max}} - h_{\text{min}}$ | $h_{\text{max}}$ , $h_{\text{min}}$ – максимальный и минимальная высота рельефа верхней поверхности |



Рисунок 3.40 – Схема определения параметров рельефа верхней поверхности

С помощью трехмерного сканера (RangeVision Pro, Geomagic Control X, диапазон измерений – 140×90×80 мм, минимальное разрешение – 0,018 мм) были построены цифровые 3D-модели для получения фактических размеров выращенных образцов. Затем цифровые модели редактировались с целью определения системы координат образцов и производилась привязка верхней плоскости образцов, для определения средней плоскости высоты наплавки. После чего с помощью программы редактирования 3D-моделей на верхней поверхности выделялись наибольшая и наименьшая высоты наплавки и, наконец, на последнем этапе для каждого образца рассчитывались отклонение высоты наплавки и нестабильность высоты наплавки на верхней поверхности.

### 3.6.2 Определение рельефа поверхности боковых стенок образцов

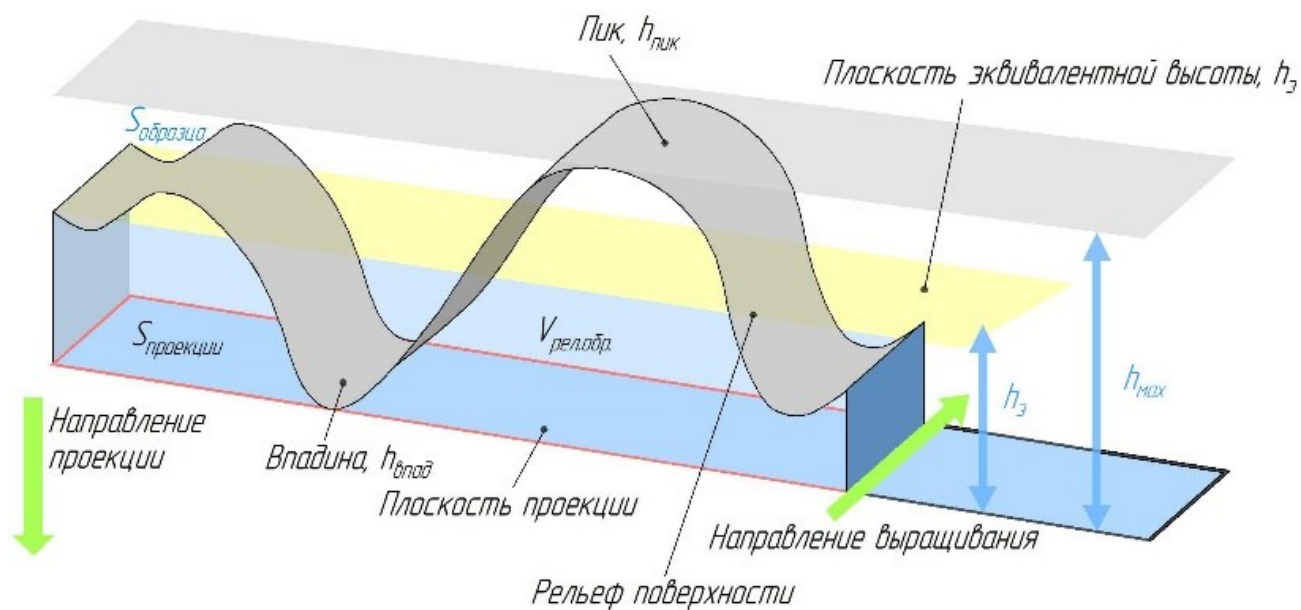
Боковые стенки полученных образцов параллельны направлению выращивания и образуются путем наложения слоев друг на друга. На боковых стенках обычно имеется множество различных выступов и впадин, отличающихся

по форме от выступов и впадин верхней поверхности. Для количественной характеристики рельефа поверхности боковых стенок предлагается использовать три параметра: максимальную высоту поверхности, эквивалентную высоту поверхности и коэффициент поверхности, расчетные формулы для определения которых приведены в таблице 3.22. Чем меньше параметры рельефа поверхности, тем ближе боковая стенка образца к плоскости и, следовательно, выше качество выращенной поверхности.

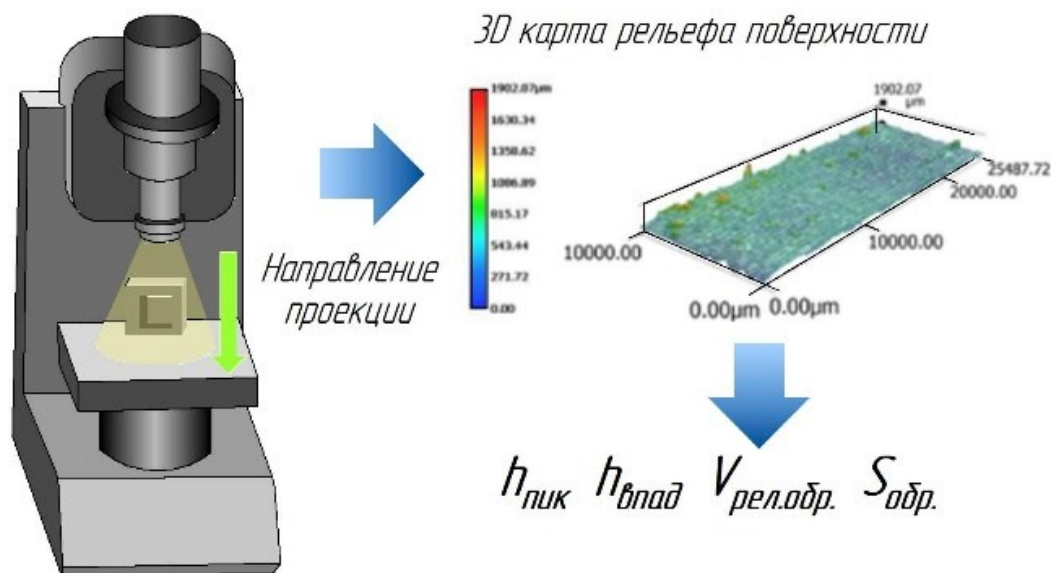
Таблица 3.22 – Параметры для характеристики рельефа поверхности на боковых стенках образцов

| Параметр рельефа поверхности                  | Определение                                                                                                                    | Расчетная формула                       |
|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Максимальная высота поверхности ( $h_{max}$ ) | Разница между высотами наивысшего пика ( $h_{пик}$ ) и самой глубокой впадины ( $h_{впад}$ ), измеренных от плоскости проекции | $h_{max} = h_{пик} - h_{впад}$          |
| Эквивалентная высота поверхности ( $h_э$ )    | Отношение объема рельефа образца ( $V_{рел.обр.}$ ) к площади плоскости проекции ( $S_{проек}$ )                               | $h_э = \frac{V_{рел.обр.}}{S_{проек}}$  |
| Коэффициент поверхности ( $c_{пов.}$ )        | Отношение площади поверхности образца ( $S_{обр.}$ ) к площади плоскости проекции ( $S_{проек}$ )                              | $c_{пов.} = \frac{S_{обр.}}{S_{проек}}$ |

Схемы определения характеристик и параметров рельефа поверхностей боковых стенок, а также процедуры их измерения приведены на рисунке 3.41. На рисунке 3.41а схематично показана часть реальной поверхности рельефа образца, выбранного для определения его характеристик и параметров, а также плоскость ее проекции, проходящая через наинизшую точку самой глубокой впадины выбранной части рельефа и перпендикулярная направлению проецирования, т.е. перпендикулярно идеальным боковым стенкам. В этом случае под объемом рельефа образца ( $V_{рел.обр.}$ ) следует понимать объем, заключенный между поверхностью выбранной части рельефа и плоскостью проекции. Процедура измерения указанных ранее в таблице 3.22 характеристик и параметров с помощью цифрового микроскопа (Espada E-U500X) приведена на рисунке 3.41б. Посредством данного микроскопа были сфотографированы четыре наружные боковые поверхности изготовленных образцов для получения трехмерных высотных картограмм поверхностей с извлечением после их последующей обработки четырех измеренных параметров:  $h_{пик}$ ,  $h_{впад}$ ,  $V_{рел.обр.}$ ,  $S_{обр.}$ .



а)



б)

Рисунок 3.41 – Определение параметров рельефа поверхности боковых стенок:  
а) схема определения параметров рельефа поверхности; б) схема проведения измерений

Для уменьшения погрешности измерений были взяты средние значения характеристик и параметров рельефа на четырех боковых стенках образцов, полученных при различных значениях расфокусировки лазерного луча, указанных в таблице 3.20. На каждой из боковых стенок область измерения составляла  $15 \times 6$  мм. При измерениях на цифровом микроскопе использовался фильтр Гаусса, а параметр S-фильтра был установлен на 50 мкм меньше размера порошка с целью устранения высокочастотных шумов. Параметр L-фильтра был равен 0,8 мм, чтобы

включить низкочастотные сигналы, вызванные выступом, но исключить данные о форме изготовленного образца.

В качестве показателей оценки измеряемых параметров достаточно часто применяют относительную амплитуду (RR) и относительное стандартное отклонение (RSD). RR и RSD использовались для оценки параметров рельефа с целью выбора величины расфокусировки лазера, обеспечивающей требуемые параметры рельефа боковых поверхностей образцов. RR и RSD рассчитываются следующим образом:

$$RR = \frac{\max(\bar{x}_i) - \min(\bar{x}_i)}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \bar{x}_i};$$

$$RSD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{s_i}{\bar{x}_i};$$

$$\bar{x}_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m x_{ij};$$

$$s_i = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_i)^2},$$

где  $x_i$  и  $s_i$  соответствуют соответственно измеренному значению и среднеквадратичному отклонению измеряемых параметров на поверхности выборки. В данной работе  $n = 6$ ,  $m = 4$ .

### ***3.6.3 Рельеф поверхности образцов, полученных***

#### ***в результате исследования влияние величины расфокусировки лазерного луча***

Величина лазерной расфокусировки – это расстояние от поверхности построения до фокальной плоскости лазера, она может иметь как положительный, так и отрицательный знак, но не является алгебраической величиной. Знак величины лазерной расфокусировки показывает лишь положение фокальной плоскости лазера относительно поверхности построения, или, иначе, состояние лазерной расфокусировки. Отрицательная величина лазерной расфокусировки означает, что фокальная плоскость лазера находится ниже поверхности построения, т. е. поверхность построения находится в состоянии отрицательной лазерной расфокусировки. Соответственно, положительная величина лазерной расфокусировки означает, что фокальная плоскость лазера находится над поверхностью построения, т. е. поверхность выращивания находится в состоянии

положительной лазерной расфокусировки. Таким образом, параметр, именуемый величиной лазерной расфокусировки, включает в себя две составляющие, а именно: числовое значение лазерной расфокусировки и состояние лазерной расфокусировки, определяемое знаком.

Морфология поверхности и отклонения размеров образцов, изготовленных при различных величинах расфокусировки лазера после их 3D-сканирования, представлены на рисунке 3.42.

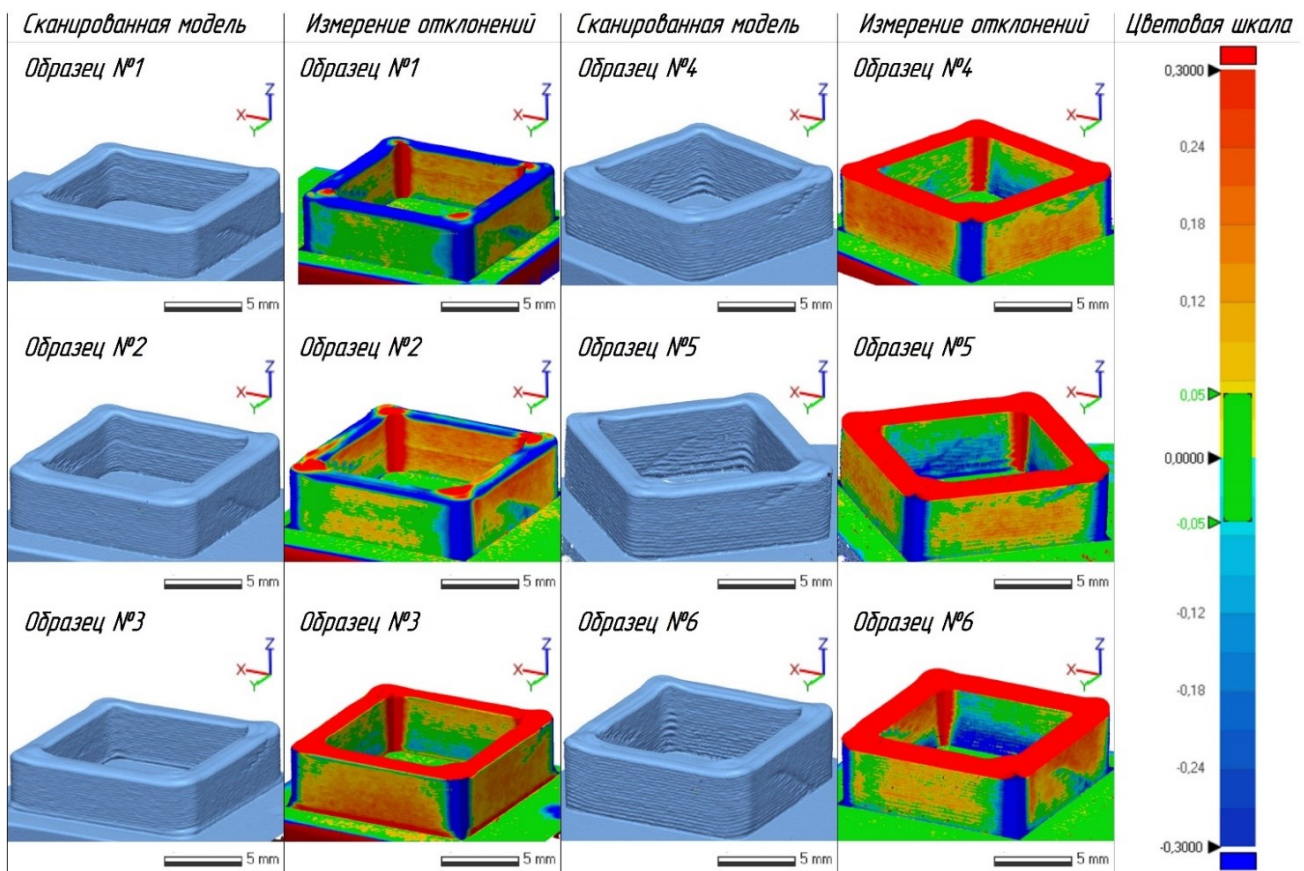


Рисунок 3.42 – Рельеф поверхности образцов, изготовленных при различной величине лазерной расфокусировки (№1: -1,5 мм, №2: -1,0 мм, №3: -0,5 мм, №4: +0,5 мм, №5: +1,0 мм, №6: +1,5мм)

Сканированные модели представляют собой воссозданные 3D-модели выращенных образцов. Следует отметить, что мелкие межслойные профили и приклеенные металлические брызги на боковых поверхностях образцов не отображены из-за ограничения разрешения 3D-сканера. На диаграммах отклонений размеров (рисунок 3.42) показаны отклонения размеров выращенных и спроектированных образцов. Из данной диаграммы видно, что у образцов, относящихся к серии экспериментов №1, выращенных при величине



расфокусировке лазера равной  $-1,5$  мм (таблица 3.20), уровень расположения верхней поверхности значительно занижен по сравнению с образцами, выращенными при других величинах расфокусировки лазера. Причем если при отрицательной расфокусировке выпуклости в точке старта выращивания более очевидны, то при положительной расфокусировке поверхность точек старта более однородна и стабильна. Относительно рельефа поверхности боковых стенок можно отметить, что при отрицательной лазерной расфокусировке отклонения меньше, чем при положительной лазерной расфокусировке.

### 3.6.3.1 Рельеф верхней поверхности образцов

Для количественного анализа рельефа верхней поверхности образцов при различных величинах расфокусировки лазера были рассчитаны отклонения высоты наплавки и нестабильность высоты наплавки у образцов, изготовленных по методике, изложенной в разделе 3.6.1. Изменение отклонения высоты выращивания в зависимости от величины расфокусировки лазера представлено на рисунке 3.43.

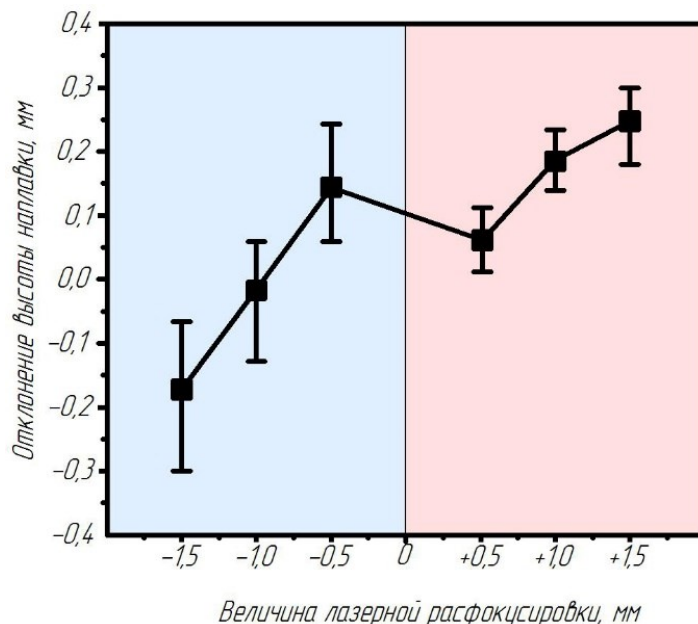


Рисунок 3.43 – Изменение отклонения от средней высоты наплавки в зависимости от величины расфокусировки лазера

Верхнее и нижнее отклонения при заданной величине расфокусировки лазера представляют собой разницу соответственно между наибольшей и наименьшей



высотами наплавки и ее средним значением. При величине расфокусировки лазера, равной  $-1,5$  мм, нижнее отклонение высоты наплавки принимает отрицательное значение, а это значит, что фактическая высота наплавки меньше расчетной, т.е. припуск на обработку недостаточен для последующей механической обработки. При других же величинах расфокусировки лазера отклонения высоты выращивания имеют положительные значения, т. е. фактическая высота выращивания больше расчетной. Следует также отметить, что при одинаковом расстоянии лазерной расфокусировки, например,  $\pm 1,5$  мм и  $\pm 1,0$  мм, знак величины лазерной расфокусировки по-разному влияет на отклонение высоты выращивания. Так, отклонение высоты выращивания образцов при положительных значениях лазерной расфокусировки меньше, чем при ее отрицательных величинах.

Изменение нестабильности высоты наплавки на верхней поверхности при различных величинах отрицательной и положительной расфокусировки представлено на рисунке 3.44. Как видно из рисунка 3.44, нестабильность высоты верхней поверхности наплавленного слоя при отрицательной расфокусировке лазера почти в два раза выше, чем при положительных значениях расфокусировки, что свидетельствует о лучшей способности слоя к формообразованию. При этом нестабильность высоты слоя на верхней поверхности возрастает с увеличением положительной расфокусировки и уменьшается с ростом отрицательной расфокусировки.

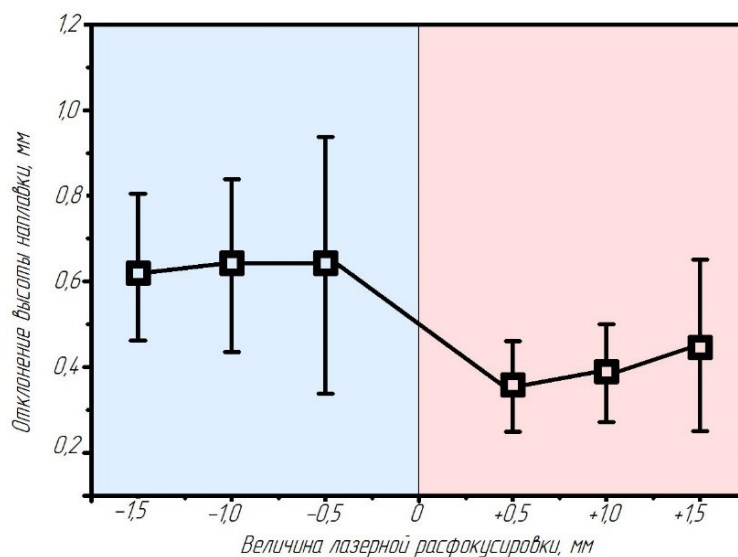


Рисунок 3.44 – Изменение нестабильности высоты верхней поверхности наплавленного слоя в зависимости от величины лазерной расфокусировки

### 3.6.3.2 Рельеф поверхностей на боковых стенках образцов

На рисунке 3.45, показан увеличенный вид рельефа поверхности с характерными выступами на боковой стенке, полученными в процессе ПЛВ при расфокусировке лазера. Образовавшиеся в результате адгезии на боковых поверхностях образцов выступы можно разделить на три категории: I – брызги металла, располагающиеся в межслоевой области, размер которых не превышает размера частиц порошка; II – беспорядочно располагающиеся брызги металла, размер которых сопоставим с размером частиц порошка; III – агломерация множества брызг металла, имеющих наибольший размер по сравнению с указанными ранее. На боковых стенках выращенных образцов имеет место большее количество слипшихся частиц порошка (категории II) и меньшее количество агломераций (категории III). Таким образом, следует, что качество поверхности постепенно ухудшается по мере увеличения количества и размера агломерационных брызг металла. Вместе с тем при отрицательной расфокусировке оно лучше, чем при положительной.



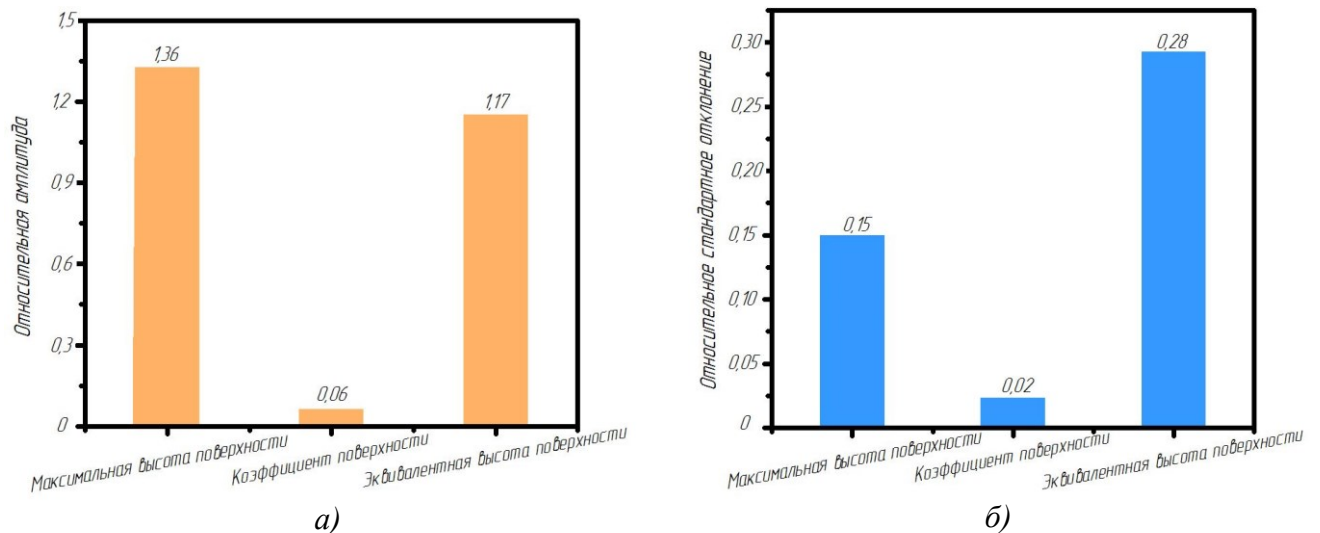
а)



б)

Рисунок 3.45 – Рельеф поверхности боковых стенок: а – агломерация множества брызг категории III; б – беспорядочно располагающиеся брызги категории II

Для выбора количественного параметра, характеризующего рельеф поверхности боковых стенок, было проведено сравнение трех параметров рельефа, предложенных в разделе 3.6.2 (таблица 3.22), а именно: максимальной высоты поверхности, эквивалентной высоты поверхности и коэффициента поверхности. Значения RR и RSD параметров рельефа поверхности, полученные после обработки результатов экспериментов, приведены на рисунке 3.46.



*а* – относительная амплитуда (RR); *б* – относительное стандартное отклонение (RSD)  
Рисунок 3.46 – Показатели оценки параметров текстуры боковой поверхности

Как видно из рисунка 3.46, RR и RSD коэффициенты поверхности имеют наименьшие значения, что свидетельствует о нецелесообразности использования данного параметра для оценки степени адгезии металлических брызг при различных величинах лазерной расфокусировки. Аналогичное заключение можно сделать и по параметру, именуемому эквивалентной высотой поверхности. Из столбчатой диаграммы рисунка 3.46 видно, что величина RR эквивалентной высоты поверхности достаточно велика, максимально также и значение RSD, что указывает на плохую повторяемость эквивалентной высоты поверхности при многократных измерениях. Вместе с тем максимальная высота поверхности имеет наибольшее значение RR и меньшее значение RSD, из чего следует, что этот параметр позволяет лучше различать степень адгезии металлических брызг на поверхности при различных величинах лазерной расфокусировки, а также имеет лучшую повторяемость. Следовательно, максимальная высота поверхности может использоваться в качестве параметра, характеризующего ее рельеф, а именно для оценки металлических брызг на боковой стенке.

Изменение максимальной высоты поверхности с указанием значений погрешности в зависимости от величины расфокусировки лазера показано на рисунке 3.47. Из данного рисунка видно, что максимальная высота поверхности монотонно снижается с уменьшением расстояния лазерной расфокусировки при

положительной расфокусировке и продолжает уменьшаться с увеличением расстояния при отрицательной лазерной расфокусировке, т.е. прилипших металлических брызг на боковой стенке становится всё меньше и меньше. Причем максимальная высота поверхности при отрицательной расфокусировке меньше, чем при положительной.

Величина лазерной расфокусировки по-разному влияет на механизм формирования верхней и боковых поверхностей образцов (заготовок). Формообразование верхней поверхности осуществляется в результате движения лазера и движения, обеспечивающего смещение валиков, а ее рельеф формируется в результате перекрытия в процессе наплавки внутрислойных валиков. Боковые поверхности и их рельеф формируются в результате перекрытия соседних контурных валиков.

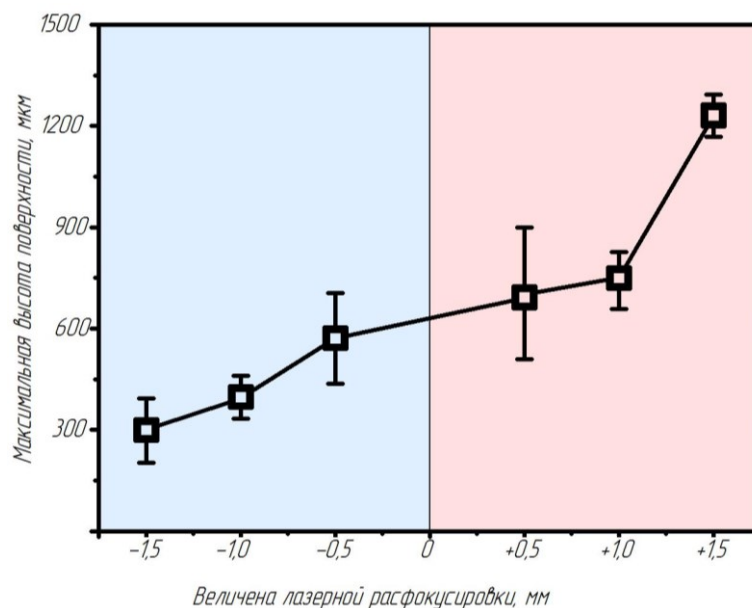


Рисунок 3.47 – Изменение максимальной высоты поверхности в зависимости от величины лазерной расфокусировки

### 3.6.3.3 Влияние величины лазерной расфокусировки на механизм формирования верхней поверхности

Высота наплавки в одном слое связана с перекрытием соседних наплавочных валиков. На рисунке 3.48 представлен эскиз процесса наплавки слоя вдоль направления перекрытия наплавочного валика. Для обеспечения в процессе

выращивания образца (заготовки) хорошего перемешивания материала при нанесении текущего валика предыдущий должен быть частично расплавлен.

Когда поглощенная поверхностью энергия от воздействия лазера превысит значение, соответствующее порогу плавления, платформа построения или наплавленный слой расплавляются с образованием ванны расплава. Авторы работы [179] предположили, что ширина наплавочного валика постепенно увеличивается, а затем быстро уменьшается с увеличением диаметра лазерного пятна. При увеличении расстояния расфокусировки лазера, как при положительной, так и при отрицательной, лазерное пятно становится больше, при этом возрастает ширина ванны расплава и количество порошка в нем, а, следовательно, увеличивается фактическое перекрытие и высота наплавочного валика.

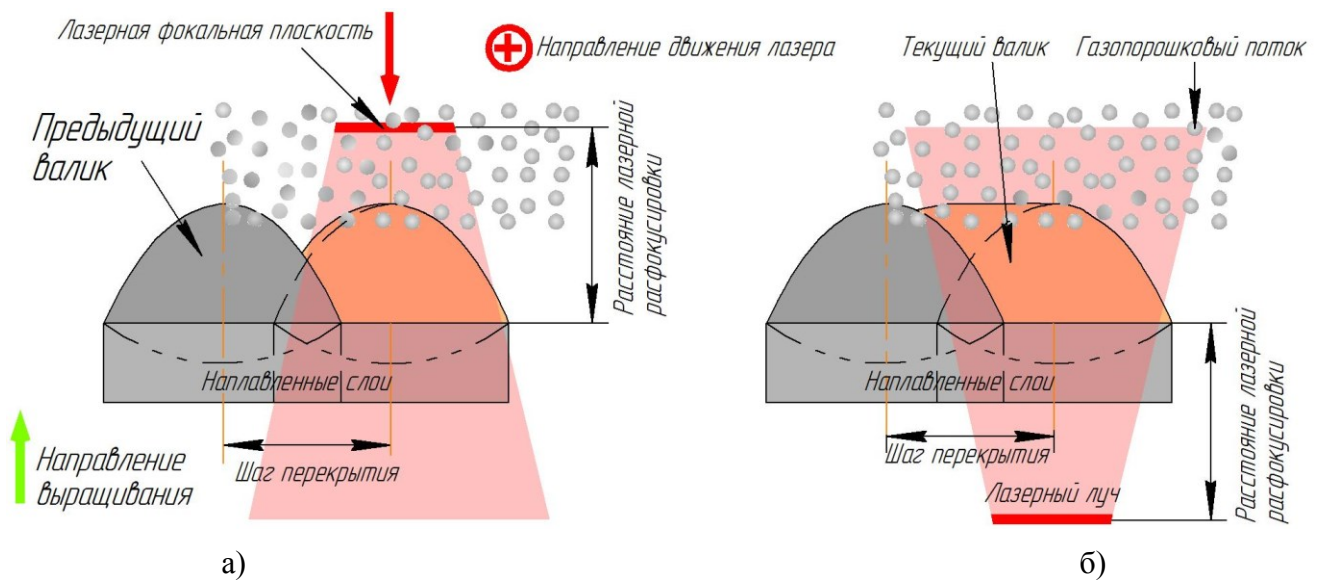


Рисунок 3.48 – Эскиз процесса наплавки вдоль направления перекрытия наплавочного валика при различной расфокусировке лазера: а – положительная лазерная расфокусировка; б – отрицательная лазерная расфокусировка

Однако при слишком большом расстоянии расфокусировки лазера энергия лазерного излучения становится рассеянной и недостаточной для расплавления платформы построения, и частиц МПК. Поэтому многослойное выращивание не получается из-за уменьшения высоты наплавки. На критическую величину расфокусировки лазера, при которой происходит срыв наплавки, влияют мощность лазера, особенности распространения лазерного луча, скорость наплавки,

приращение по оси  $Z$ , теплофизические свойства материала и т. д. В данном исследовании критическая величина отрицательной лазерной расфокусировки находится в пределах 8,0~8,5 мм, а критическая величина положительной лазерной расфокусировки – не более 14,0 мм. Кроме того, эффект ослабления энергии лазерного излучения потоком порошка приводит к тому, что критическая величина положительной расфокусировки больше, чем критическая величина отрицательной расфокусировки. При одинаковом расстоянии расфокусировки лазера энергия лазерного излучения в условиях положительной расфокусировки меньше ослабляется частицами порошка, чем в условиях отрицательной, поскольку область связи между лазерным лучом и газопорошковой струей над поверхностью образца меньше. В результате при положительной расфокусировке на поверхность образца попадает больше лазерной энергии, поэтому критическая величина положительной расфокусировки больше, чем критическая величина отрицательной лазерной расфокусировки.

На высоту наплавки существенное влияние оказывает не только расстояние расфокусировки лазера, но и состояние расфокусировки, обусловленное особенностями распространения лазерного луча. При одинаковом расстоянии расфокусировки лазера отклонение высоты слоя при положительной расфокусировке меньше, чем при отрицательной, даже если диаметр лазерного пятна на поверхности заготовки одинаков. Диаметр лазерного луча на текущей дорожке постепенно уменьшается по направлению роста, так как при положительной расфокусировке лазерный луч расходится и, как следствие, снижается высота наплавляемого слоя за счет уменьшения площади лазерного излучения, ширины ванны расплава и количества порошка, поступающего в ванну расплава. И, наоборот, при отрицательной расфокусировке высота однослойной наплавки увеличивается, так как диаметр лазерного луча постепенно возрастает вдоль направления роста за счет сходящегося лазерного луча. При одинаковых расстояниях расфокусировки лазера и смещения дорожки средняя высота слоя при положительной расфокусировке меньше, чем при отрицательной. Поэтому отклонение высоты слоя на верхней поверхности при положительной



расфокусировке меньше, чем при отрицательной, после многослойной лазерной наплавки.

В процессе ПЛВ обычно образуются неровные поверхности, содержащие выступы и ямки из-за колебаний потока порошка и ускорения/замедления лазерной головки при наплавке. На рисунке 3.49 показаны схемы процесса наплавления МПК на неровную поверхность вдоль направления сканирования лазера при положительной/отрицательной расфокусировке лазера и отрицательной расфокусировке порошка. Следует отметить, что неровности и ямки для наглядности существенно увеличены. Перепад высот между бугорками и ямками невелик при однослойном наплавлении порошка. Однако при определенных условиях многослойного наплавления, как будет показано далее по тексту, возможно появление хорошо заметных бугорков или ямок на верхней поверхности.

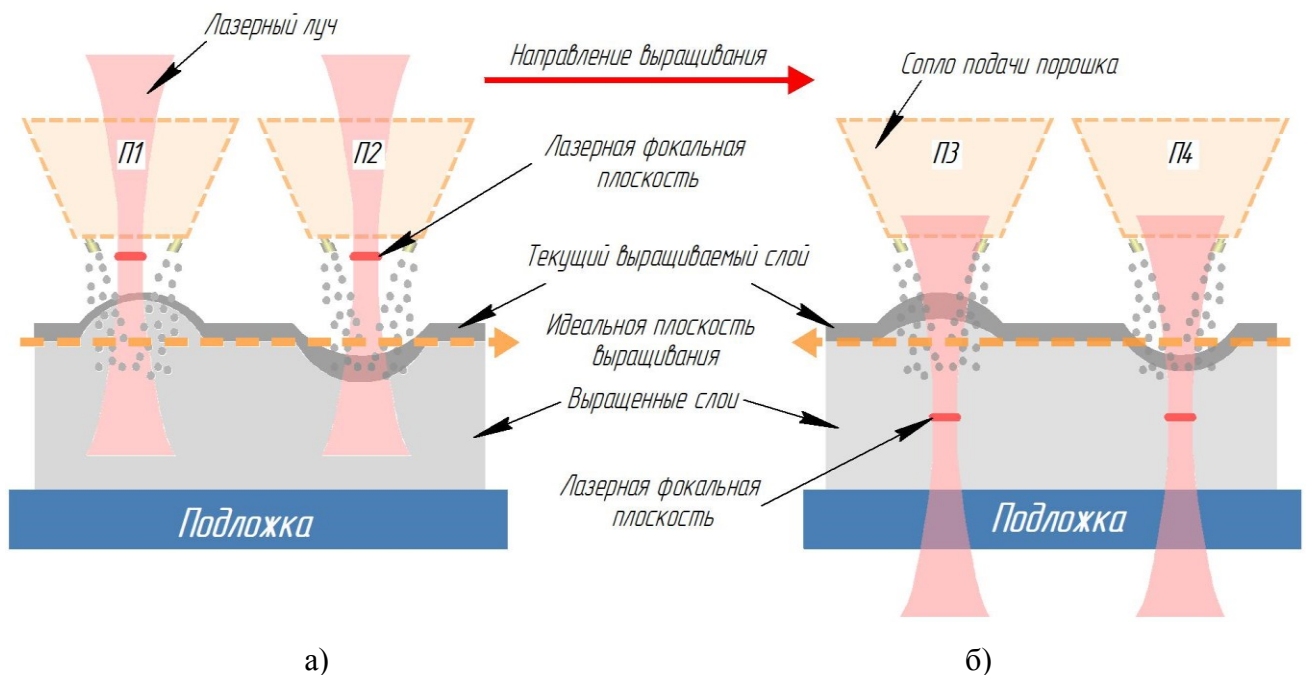


Рисунок 3.49 – Схемы процесса наплавки порошка:

- а – при положительной расфокусировке лазера и отрицательной расфокусировке порошка;  
б – при отрицательных значениях расфокусировки лазера и порошка

Как видно из рисунка 3.49а, при положительной расфокусировке лазера на выпуклых участках (выступах) наплавляемой поверхности (положение П1) наблюдается уменьшение расстояния расфокусировки лазера и увеличение расстояния расфокусировки порошка по сравнению с тем случаем, если бы наплавляемая поверхность была идеальной, т. е. отклонение от плоскостности

равнялось нулю. При этом, во-первых, уменьшается диаметр лазерного пятна, что приводит к снижению ширины ванны расплава и, следовательно, уменьшению поступающего в нее количества порошка. А во-вторых, увеличивается диаметр пятна порошка, что, в свою очередь, приводит к его рассеиванию (диспергированию) и снижению концентрации в потоке и, как следствие, также к уменьшению количества порошка, поступающего в ванну расплава. При положительной расфокусировке высота текущего наплавляемого слоя на выпуклых участках поверхности уменьшается из-за наложения лазерного луча и потока порошка. При увеличении числа слоев неровности сглаживаются и постепенно исчезают.

Воздействие положительно расфокусированного лазера на вогнутые участки (ямки) наплавляемой поверхности (положение П2) приводит к увеличению расстояния его расфокусировки и уменьшению расстояния расфокусировки порошка. В этом случае при положительной расфокусировке высота слоя в вогнутой поверхности за счет наложения лазерного луча и потока порошка увеличивается. С увеличением числа слоев ямки становятся плоскими и постепенно исчезают. Таким образом, при колебаниях высоты слоя под действием положительной лазерной расфокусировки возникает самостабилизация процесса.

При воздействии лазерного луча с отрицательной расфокусировкой (рисунок 3.49б) участки реальной наплавляемой поверхности (положение П3), содержащей как выпуклые, так и вогнутые участки, в отличие от идеальной поверхности, происходит увеличение расфокусировки лазера и порошка. В этом случае наблюдаемый рост диаметра лазерного пятна приводит к увеличению ширины ванны расплава и количества порошка, поступающего в нее, а имеющее место увеличение диаметра пятна порошковой струи способствует рассеиванию порошка и снижению концентрации его в потоке, а также уменьшению количества порошка, поступающего в ванну расплава. В результате взаимодействия лазерного луча и потока порошка на ранней стадии формирования неровностей в условиях отрицательной расфокусировки наблюдается увеличение их высоты, а затем на определенной стадии роста этих неровностей происходит его стабилизация за счет



значительного снижения концентрации потока порошка. Таким образом, неровности становятся более заметными.

В то же время при воздействии отрицательно расфокусированного лазера на вогнутую поверхность (положение П4) расстояния расфокусировки лазера и порошка одновременно уменьшаются. При этом отрицательно расфокусированный лазер ограничивает эффект восстановления потока порошка в области вогнутости, что приводит к образованию мелких ямок. Исходя из ранее изложенного, можно сделать заключение, что процесс ПЛВ в условиях отрицательной расфокусировки сопровождается плохой стабильностью высоты наплавки, когда высота слоя колеблется.

Как было показано ранее, в пределах критических величин лазерной расфокусировки отклонение высоты слоя увеличивается по мере увеличения расстояния лазерной расфокусировки, причем как при положительных, так и при отрицательных значениях. При одинаковом расстоянии расфокусировки лазера отклонение высоты наплавки при положительной расфокусировке меньше, чем при отрицательной, даже если диаметр лазерного пятна одинаков. Таким образом, при послойной наплавке материала и положительной расфокусировке верхняя поверхность образцов имеет тенденцию к выравниванию за счет наблюдаемых явлений самостабилизации процесса ПЛВ.

#### *3.6.3.4 Механизм образования налипших выступов на боковой стенке*

При осуществлении процесса ПЛВ лазерная головка движется по запрограммированной траектории, обеспечивая послойное наращивание материала, которое сопровождается физическими процессами плавления материала, формирования ванны расплава и подачи в нее порошка, а также затвердевания материала. Появление брызг на боковых стенках связано с процессом взаимодействия лазерного луча, порошкового потока и слоя расплава.

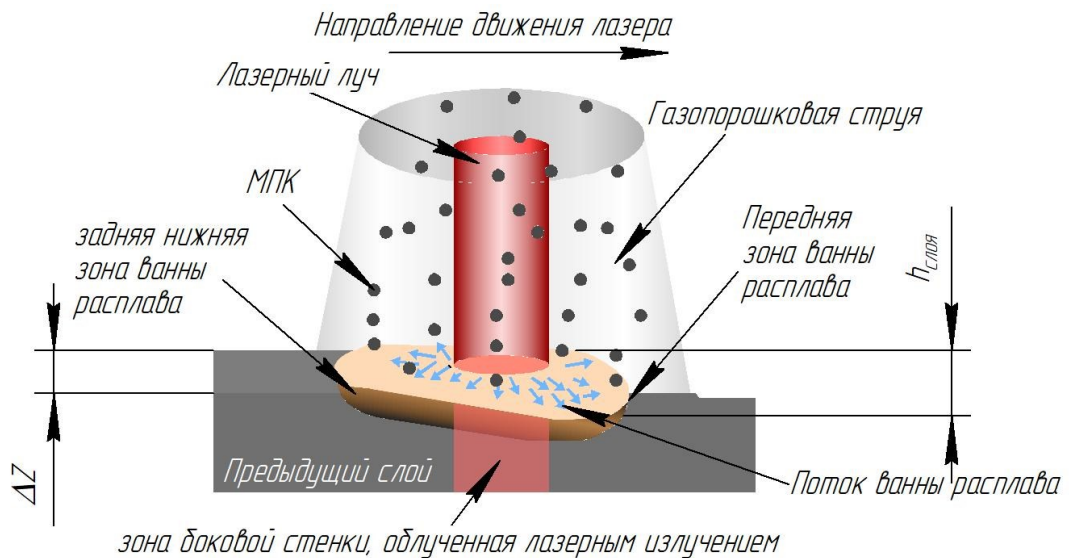


Рисунок 3.50 – Процесс взаимодействия лазерного луча, газопорошковой струи и ванны расплава:  $h_{\text{слоя}}$  – высота наплавления одного слоя;  $\Delta Z$  – приращение по оси  $Z$  после наплавления слоя

На рисунке 3.50 можно выделить три характерные области ванны расплава, связанные с прилипшими металлическими брызгами: переднюю зону ванны расплава, заднюю нижнюю зону ванны расплава и зону боковой стенки, облученную лазерным излучением. В передней зоне происходит постепенное расплавление наплаваемого слоя с образованием ванны расплава. Передняя зона расположена перед ванной расплава и вытянута вдоль ее передней границы непосредственно от верхней до нижней точки, а ее высота равна высоте одного слоя наплавки ( $h_{\text{слоя}}$ ). Задняя нижняя зона ванны расплава – это место постепенного затвердевания жидкого расплава. Задняя нижняя зона расположена в задней части ванны расплава и вытянута вдоль ее задней границы от самой нижней точки ванны расплава до точки, соответствующей приращению  $\Delta Z$  (рисунке 3.50) по оси  $Z$ , т. е. ее высота равна приращению  $\Delta Z$ . Зона боковой стенки, облученная лазерным излучением, – это зона воздействия лазерного луча на боковую стенку, площадь которой зависит от особенностей распространения лазерного луча (размера пятна, угла расхождения, распределения плотности энергии) и взаимного расположения боковой стенки и лазерного луча.

Процесс налипания частиц порошка связан с их захватом в задней нижней зоне расплава. Порошок, вылетающий из сопла, попадает в нее, где после захвата его ванной расплава превращается в более мелкую фракцию. Это обусловлено тем,

что температура в задней зоне ванны расплава колеблется вокруг точки плавления, в результате чего происходит частичное расплавление частиц порошка из-за недостаточного теплообмена в ванне расплава. При этом несколько полурасплавленных частиц порошка, находящихся в задней зоне, могут объединяться в кластеры, о чём свидетельствуют результаты наблюдений авторов работы [180]. Когда скопления порошковых частиц встречаются с границей ванны расплава, они постепенно затвердевают, превращаясь в слипшиеся металлические брызги. При наплавке последующего слоя слипшиеся металлические брызги на верхней поверхности образца переплавляются и становятся частью наплавленного слоя, а металлические брызги, образованные в задней нижней зоне ванны расплава, не расплавляются и остаются на боковой стенке.

Образование скопления слипшихся частиц и рост брызг на боковых стенках тесно взаимосвязаны. Как видно из рисунка 3.51, при наплавлении внешнего контура лазерный луч облучает боковую стенку ниже ванны расплава. При этом прилипшие выступы на боковине под воздействием лазерного нагрева частично оплавляются с образованием микрованн расплава, в которые попадают частицы порошка. Учитывая, что формирование заготовок при ПЛВ осуществляется на основе многократного наплавления материала, то и выступы подвергаются многократному тепловому воздействию с добавлением порошка в микрованны расплава, приводящему к существенному росту боковых выступов.

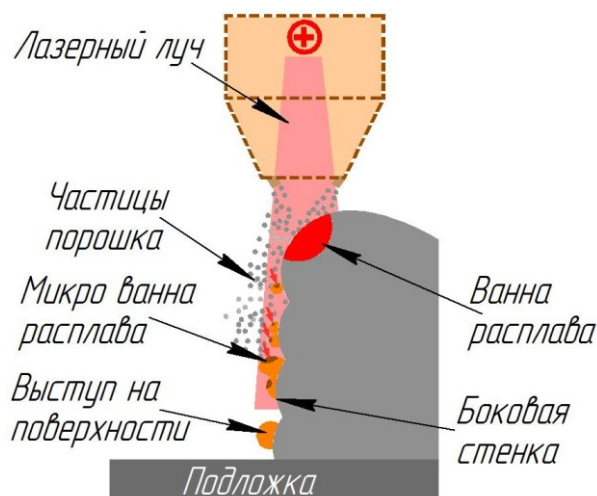


Рисунок 3.51 – Схематическое изображение процесса накопления металлических брызг на боковых стенках

Как видно из рисунка 3.51, при наплавке внешнего контура лазерный луч облучает боковую стенку ниже ванны расплава. При этом прилипшие металлические брызги на боковой стенке под воздействием нагрева лазерного луча частично оплавляются с образованием микрованн расплава, в которые попадают частицы порошка. Учитывая, что формирование заготовок при ПЛВ осуществляется на основе многослойной лазерной наплавке материала, металлические брызги подвергаются многократному тепловому воздействию с добавлением порошка в микрованны расплава, приводящему к существенному росту боковых агломераций множества брызг.

Как видно из рисунка 3.51, несколько боковых брызг ниже ванны расплава нагреваются лазерным лучом, в результате чего на них образуются микрованны расплава, в которые произвольным образом падают частицы летящего порошка. По мере удаления от данных брызг лазерного луча они постепенно затвердевают и увеличиваются (рисунок 3.51). При многослойной наплавке боковые брызги вновь облучаются и расплавляются лазерным лучом. При этом отдельные брызги продолжают расти и сливаться с соседними, превращаясь в более крупные образования. С увеличением количества наплавленных слоев ванна расплава постепенно удаляется от ранее образовавшихся металлических брызг, поэтому они перестают расти, так как энергия лазера становится недостаточной для образования микрованн расплава, а окончательно сформированные металлические брызги остаются на боковой стенке. С учетом суммарного эффекта многослойной наплавки число скоплений металлических брызг вдали от ванны расплава будет больше, чем вблизи нее. Необходимо отметить, что слипание скоплений в зоне облучения боковой стенки возможно при наличии следующих двух условий. Во-первых, лазерный луч должен обеспечить нагрев боковой стенки для формирования микрованн расплава. Факторами, влияющими на процесс нагрева, являются состояние расфокусировки лазера, плотность лазерной энергии, состояние наклона боковой стенки и т. д. Так, например, в зоне боковой стенки, облучаемой лазером, где лазерный луч расходится ниже ванны расплава, более

высокая плотность лазерной энергии и наклон боковой стенки внутрь приводят к расплавлению лазерным лучом металлических брызг боковой стенки. Во-вторых, МПК, поступающая в рабочую зону, должна обеспечить рост металлических брызг. Например, увеличение скорости подачи порошка, снижение скорости перемещения сопла со сварочной головкой и уменьшение приращения по оси  $Z$  способствуют росту металлических брызг.

### **Выводы по главе 3**

1. Исследование формы и гранулометрического состава металлопорошковой композиции жаропрочного сплава ЭП648 показало, что металлопорошковый материал имеет сферическую форму (97%) и 3% – округлую форму с диапазоном рассеивания частиц от 63 до 210 мкм, что составляет 74,76%. Распределение удельной массовой доли частиц МПК по размерам показывает, что основную массу 81,5% составляют частицы в диапазоне от 140 до 200 мкм.

2. Определение рациональных технологических параметров процесса ПЛВ, из определенного в главе 2 диапазона, осуществлялось с помощью проведения испытаний цилиндрических образцов на одноосное растяжение. С использованием теории планирования эксперимента и статистической обработки данных, были выявлены регрессионные зависимости механических свойств образцов от мощности лазерного излучения. Регрессионная зависимость позволила установить, рациональные технологические параметры процесса ПЛВ, обеспечивающая требуемый уровень механических свойств и структуры: мощность лазерного излучения 2000 Вт, скорость выращивания – 25 мм/с, расход МПК – 26,6 г/мин.

3. Исследование влияния технологических режимов термической обработки на формирование структуры и механических свойства заготовок для крупногабаритных деталей авиационных ГТД из высоколегированного жаропрочного сплава на никелевой основе ЭП648 в состоянии после прямого лазерного выращивания показало, что рациональным режимом термообработки, позволяющим обеспечить требуемый уровень механических свойств и структуры является следующий: 1) температура нагрева  $1180 \pm 10^\circ\text{C}$ , выдержка 4 часа и

охлаждение на воздухе; 2) температура нагрева  $900 \pm 10^{\circ}\text{C}$ , выдержка 16 часов и охлаждение на воздухе, что обеспечивает получение твёрдости равной  $236 \pm 29$  НВ.

4. Исследование влияния величины лазерной расфокусировки на рельеф поверхности при прямом лазерном выращивании показало, что в пределах величины расфокусировки лазера  $\pm 1,5$  мм отклонение высоты наплавки уменьшается от  $-0,3$  мм до  $0,2$  мм по мере уменьшения расстояния расфокусировки. При одинаковом расстоянии лазерной расфокусировки отклонение высоты наплавки меньше при ее положительных значениях и больше при отрицательных значениях. Стабильность высоты наплавки лучше при положительной лазерной расфокусировке, что свидетельствует о самостабилизации процесса. Процесс наплавки при положительной лазерной расфокусировке позволяет поддерживать многослойную наплавку и гарантирует припуск на последующую механическую обработку.

## ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЗАГОТОВОК АВИАЦИОННЫХ ГТД МЕТОДОМ ПЛВ

Разработка технологического процесса (ТП) изготовления заготовок деталей авиационных ГТД методом ПЛВ является сложной, многовариантной задачей, требующей учёта большого числа факторов. В основу разработки технологического процесса заложены технический, экономический и организационный принципы, обеспечивающие гарантированное выполнение требований, предъявляемых к рабочему чертежу [5, 13], при минимальных затратах труда и издержек производства.

Порядок разработки и постановки продукции на производство изложен в ГОСТ Р 15.301, в котором приведены правила разработки и постановки на производство продукции производственно-технического назначения, в том числе правила разработки технического задания, конструкторской и технологической документации, приемки результатов разработки, подготовки и освоения производства, проведения испытаний опытных образцов продукции и продукции, изготовленной при освоении производства, а также правила подтверждения их соответствия обязательным требованиям. Контроль качества разработанных технологических процессов и их приёмку осуществляли на этапах предварительных и приёмочных испытаний в соответствии с разработанными программами и методикам проведения испытаний.

### **4.1 Этапы проектирования технологического процесса ПЛВ**

Проектирование технологического процесса изготовления заготовок деталей методом ПЛВ можно разделить на семь этапов, представленных на рисунке 4.1.

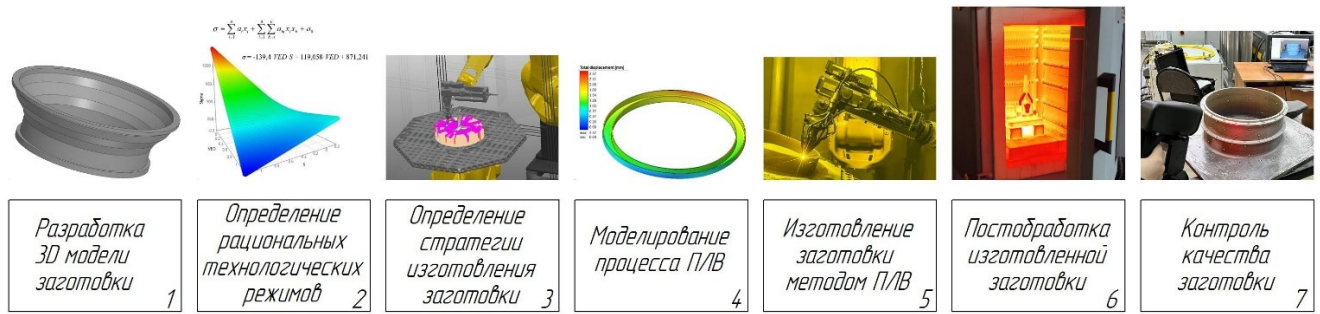


Рисунок 4.1 – Основные этапы изготовления заготовок по технологии ПЛВ

1. Разработка электронной геометрической модели заготовки осуществляется на основе чертежа и электронной геометрической модели детали. При проектировании электронной геометрической модели заготовки к поверхностям модели детали добавляется необходимый припуск для последующей механической обработки, а также обязательный технологический припуск, необходимый для отделения заготовки от платформы построения.

2. Самых трудоёмких является этап определения рациональных технологических параметров процесса ПЛВ, а именно: скорость выращивания, мощность лазерного излучения, толщина наплавляемого слоя и т.п. Если рациональные режимы процесса ПЛВ для используемой МПК уже известны, то этот этап можно пропустить иначе для определения рациональных технологических параметров потребуется проведение математического моделирования и экспериментальных исследований.

3. Определение стратегии выращивания заготовки методом ПЛВ. Суть данного этапа заключается в выборе наивыгоднейшей траектории движения технологического инструмента, условий его безопасного перемещения, задании рациональных технологических режимов и т.д. По сути дела, все ранее перечисленные компоненты представляют собой рациональные условия выращивания.

4. Этап «Моделирование процесса ПЛВ» включает формирование управляющей программы (УП) для роботизированной установки и симуляцию процесса прямого лазерного выращивания, необходимую для улучшения



параметров данного процесса и предварительной оценки его производительности, а также оформление технологической документации.

5. На этапе «Изготовление заготовки методом ПЛВ» осуществляется подготовка платформы построения, закрепление на столе 2-х осевого позиционера и передача в контроллер робота файла УП, содержащего в себе информацию о траектории перемещения технологического инструмента и двух осевого позиционера и используемых технологических параметрах процесса ПЛВ. В него входит подготовка аддитивной установки к работе и сам процесс ПЛВ в соответствии с созданной электронной геометрической моделью заготовки.

6. Этап «Постобработка изготовленной заготовки» содержит операции, направленные на отделение заготовки от платформы построения, удаление неиспользованного сырья, а также операции термообработки. Указанные ранее слесарные операции могут осуществляться как с использованием ручного, так и механизированного инструмента.

7. На этапе «Контроль качества заготовки» осуществляется контроль геометрических параметров, физико-механических свойств, структуры материала заготовки и т.д.

#### **4.2 Разработка методики проектирования технологического процесса ПЛВ крупногабаритных заготовок камер сгорания ГТД**

Основы методологии разработки ТП изложены в стандартах единой системы технологической подготовки производства (ЕСТПП). А классификация, этапы разработки и области применения технологических процессов приведены в рекомендациях Р 50-54-93-88 [181], согласно которым разработка ТП на каждом уровне базируется на внедрении научно-технических достижений и передового опыта промышленности в области технологий машиностроения и рациональном использовании материальных и трудовых ресурсов производства с учетом конкретных производственных условий.

Разработка перспективных ТП должна быть основана на результатах проведения научно-исследовательских, опытно-технологических и опытно-

конструкторских работ, данных прогнозирования новых методов обработки, разработки и исследования перспективных технологических возможностей предприятий, анализа опыта применения новых методов и средств технологического оснащения другими предприятиями промышленности [181].

На основании материалов, изложенных в главе 1 и производственного опыта использования процесса ПЛВ при изготовлении заготовок, предложена методика проектирования технологического процесса изготовления крупногабаритных заготовок деталей камеры сгорания ГТД, которая позволяет обеспечить достижение требуемых параметров качества.

Предложенная методика предполагает работу в двух модулях (CAD/CAE), применение базы данных режимов выращивания [182], технологических процессов и разработанных регрессионных моделей влияния технологических параметров выращивания на параметры качества изготавливаемых заготовок технологией ПЛВ. Алгоритм проектирования технологического процесса изготовления крупногабаритных заготовок деталей авиационных ГТД технологией ПЛВ представлен на рисунках 4.2 и 4.3.

В качестве исходных данных (поз. 1, рисунок 4.2) для разработки технологического процесса, изготовления крупногабаритных заготовок деталей камер сгорания ГТД технологией ПЛВ, следует использовать:

- информацию, содержащуюся в конструкторской документации (на рабочем чертеже детали), а также электронную геометрическую модель детали и заготовки;
- стандарты и ГОСТы, регламентирующие использование аддитивных технологий при изготовлении заготовок;
- технологические инструкции по назначению технологических параметров процесса ПЛВ; инструкция по эксплуатации аддитивной установки ИЛИСТ-L, а также технологические процессы-аналоги.

Конструкционные элементы и компоненты деталей проектируются таким образом, чтобы деталь была технологична для её изготовления традиционными методами механической обработки.

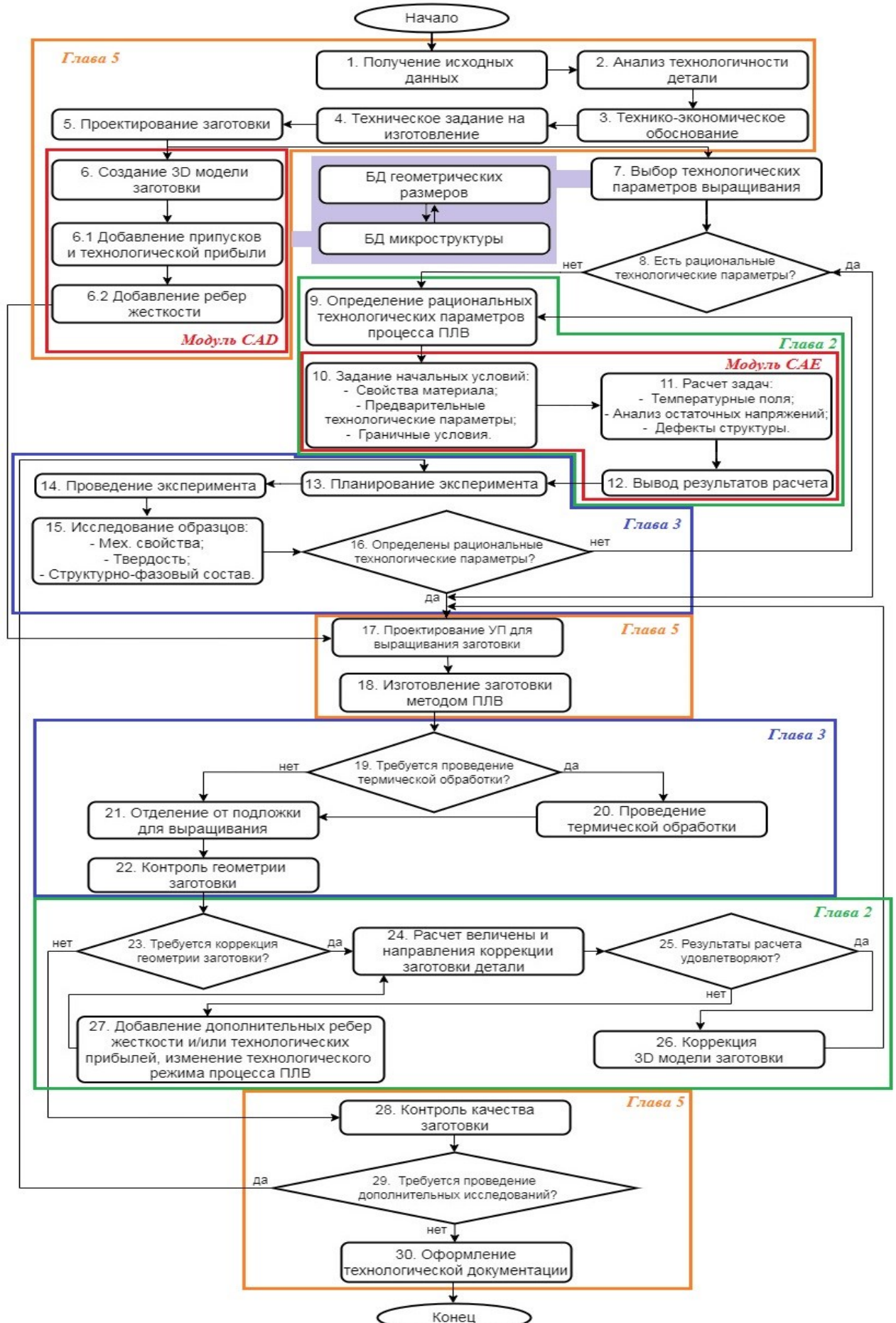


Рисунок 4.2 – Блок-схема алгоритма проектирования ТП ПЛВ

Решение о возможности использования технологии ПЛВ для изготовления заготовок принимается на этапе анализа технологичности детали (поз. 2, рисунок 4.2), в котором проводится анализ технологичности конструкции детали, даётся оценка возможности обеспечения точности геометрических размеров и отклонения формы с обеспечением требуемых параметров качества поверхности. На этом этапе осуществляется определение стратегии изготовления заготовки методом ПЛВ и её расположение на платформе построения относительно рабочих органов роботизированной аддитивной установки ИЛИСТ-L. Полученные данные, являются исходными для создания технико-экономического обоснования применения технологии ПЛВ для изготовления заготовок деталей авиационных ГТД (поз. 3, рисунок 4.2).

В стоимость изготовления заготовок технологией ПЛВ входят: процесс изготовления; вспомогательные операции, связанные с подготовкой аддитивной установки ИЛИСТ-L к работе; создание управляющей программы для роботизированной установки ИЛИСТ-L и контроль за установкой в процессе работы. Для определения стоимости изготовления заготовок деталей технологией ПЛВ необходимо иметь следующие данные:

– количество МПК для выращивания заготовки с технологическими элементами, которое складывается из:

- 1) МПК для выращивания непосредственно заготовки;
- 2) МПК для выращивания «технологической прибыли» и при необходимости дополнительных технологических припусков и рёбер жёсткости;
- 3) МПК, не попавшего в ванну расплава в процессе изготовления заготовки и зависящего от коэффициента захвата порошка (КЗП);

– количество инертного газа (аргон), которое складывается из:

- 1) защитного газа для заполнения кабины построения ( $\approx 9$  м<sup>3</sup>);
- 2) транспортного газа, требуемого для подачи МПК в зону выращивания (5 л/мин);
- 3) газа для защиты оптических элементов (10 л/мин);

– времени работы аддитивной установки требуемого для изготовления заготовки.

Результатом выполнения алгоритма, позиции с 1 по 3, является разработка технического задания (поз. 4, рисунок 4.2) изготовления заготовки методом ПЛВ. В соответствии техническим заданием приступают к проектированию заготовки детали и её электронной геометрической модели (поз. 6, рисунок 4.2). Осуществляется анализ поверхностей деталей, состоящий из анализа расположения поверхностей детали относительно платформы построения и требований к точности их изготовления и шероховатости.

Так для исследуемого высоколегированного жаропрочного сплава на никелевой основе ЭП648, шероховатость поверхности, которую можно получить после процесса ПЛВ  $Ra = 12,5$  мкм и грубее. Если для поверхности задана шероховатость меньше  $Ra = 12,5$  мкм, то для этих поверхностей необходимо закладывать припуск для последующей механической обработки. Аналогично для выполнения требований по точности размеров и расположению поверхностей. Разработка электронной геометрической модели заготовки проводится с использованием CAD системы. Алгоритм разработки и проектирования заготовки детали представлен в виде блок-схемы на рисунке 4.3. Использование аддитивной технологии ПЛВ позволяет изготавливать заготовки сложной формы без использования специальной оснастки, однако при этом существует ряд ограничений по используемым конструктивным элементам в заготовках. В разделе 4.3 представлены рекомендации по проектированию конструктивных элементов заготовок, изготавливаемых технологией ПЛВ.

Ключевым этапом в разработке технологического процесса производства крупногабаритных заготовок методом ПЛВ, является определение рациональных технологических параметров процесса ПЛВ (поз. 7, рисунок 4.2). Основные технологические параметры, связанные с процессом ПЛВ описаны в главе 1. На рисунке 4.4 представлена блок-схема алгоритма, который позволяет определить рациональные технологические параметров процесса ПЛВ. Чтобы найти диапазон рациональных значений технологических параметров применительно к конкретному материалу, обеспечивающих требуемые геометрические размеры наплавочных валиков, необходимо провести тщательный анализ литературных источников и установить имеющиеся режимы выращивания для материалов аналогов, а также использовать накопленный производственный опыт. При этом

поиск целесообразно осуществлять с использованием метода планирования эксперимента.

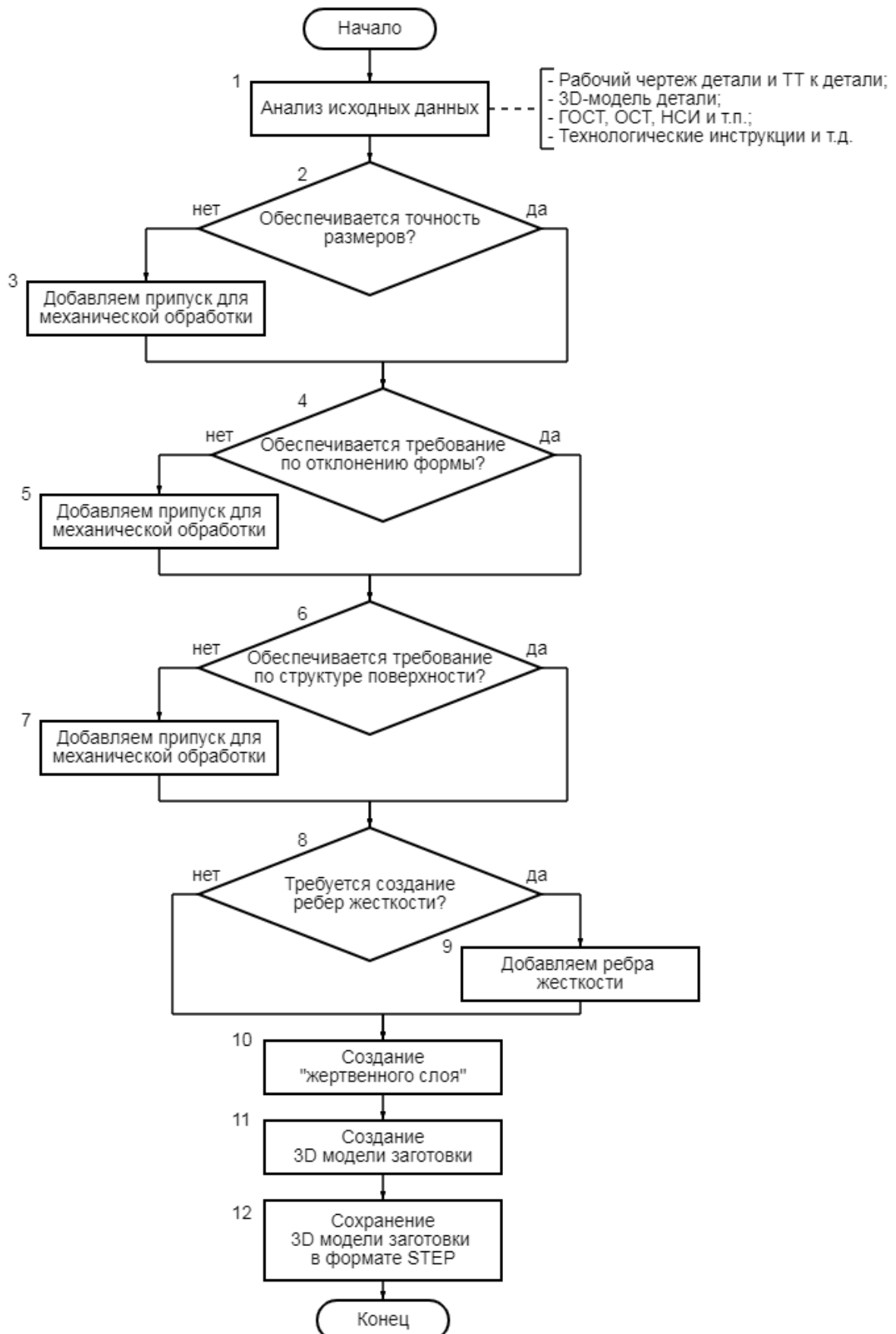


Рисунок 4.3 – Блок-схема алгоритма разработки заготовки детали

На основе использования модели взаимодействия МПК с лазерным излучением в процессе ПЛВ выполняются численные эксперименты по установлению влияния основных технологических параметров ПЛВ (мощности лазерного излучения, скорости газопорошковой струи, насыпной плотности МПК и среднего радиуса частиц МПК) на расстояние до зоны расплавления МПК и геометрические размеры наплавочного валика (ширину и высоту), затем разрабатываются соответствующие регрессионные модели. На основании полученных данных численного моделирования процесса ПЛВ о расстоянии, гарантирующее полное расплавление МПК и геометрических размерах наплавочного валика, определяется нахождение диапазона рациональных технологических параметров процесса ПЛВ.

Далее следует этап уточнения значений рациональных технологических параметров процесса ПЛВ посредством исследования механических свойств материала на соответствие требуемым. В данной работе выполнен комплекс исследований по оценке влияния технологических параметров процесса ПЛВ на отсутствие трещин и механические свойства выращенного материала.

Поэтому при определении рациональных диапазонов технологических параметров процесса ПЛВ учитывалось не только достижение требуемых геометрических параметров ванны расплава, но и обеспечение отсутствия трещин, и получение наилучших значений целевых характеристик. Контроль выращенного материала осуществлялся в соответствии с требованиями и с использованием методик, представленных в ГОСТ Р 57910 «Материалы для аддитивных технологических процессов. Методы контроля и испытаний металлических материалов сырья и продукции». Отработка алгоритма определения рациональных технологических параметров процесса ПЛВ на МПК из жаропрочного сплава ЭП648 представлена в главах 2 и 3. Информация по определенным рациональным технологическим параметрам процесса ПЛВ заносится в базу данных [182], после чего осуществляется разработка управляющей программы для роботизированной установки ИЛИСТ-L с использованием рациональных технологических параметров процесса ПЛВ (поз. 17, рисунок 4.2).

Процесс производства крупногабаритных заготовок методом ПЛВ включает в себя последовательно нагревание высокотемпературным лазерным излучением и расплавление МПК с образованием ванны расплава непосредственно на поверхности платформы построения или предыдущего слоя, а затем её остывания и кристаллизации. В результате поверхность платформы построения и/или заготовки испытывают большое количество циклов нагрева и охлаждения, что является причиной возникновения остаточных напряжений и, как следствие, приводит к деформации как платформы построения, так и заготовки. Повышение точности изготовления достигается за счёт предсказания уровня остаточных напряжений и деформаций и внесение предеформаций в изготавливаемые заготовки.

На рисунке 4.5 представлена блок-схема алгоритма коррекции заготовки. Компенсировать воздействие остаточных напряжений на точность заготовок, получаемых методом ПЛВ посредством проведения коррекции их электронных геометрических моделей (поз. 24, рисунок 4.2), добавлением ребер жёсткости, технологической прибыли, увеличением толщины стенок, а также изменением значений технологических параметров процесса ПЛВ (поз. 27, рисунок 4.2).

В случае, если остаточные напряжения, действующие на заготовку, приводят к выходу её деформации и при этом размеры превышают допустимые значения, тогда решением может стать изменение конструкции заготовки. Для этого необходимо вернуться к этапу проектирования заготовки (поз. 6, рисунок 4.2) и опираясь на результаты обработки отклонений реальных заготовок деталей, полученных в процессе ПЛВ и изменить расположение рёбер жесткости (поз. 6.2, рисунок 4.2). Ещё одним решением может стать изменение используемых технологических параметров процесса ПЛВ (поз. 9, рисунок 4.2), в том числе мощности лазерного излучения, скорости выращивания, расхода МПК и продолжительности технологической паузы. Другим действенным способом является предварительная коррекция геометрии заготовки. Так, разработанная электронная геометрическая модель заготовки корректируется в соответствии



полученными результатами отклонения реальной уже выращенной заготовки методом ПЛВ.

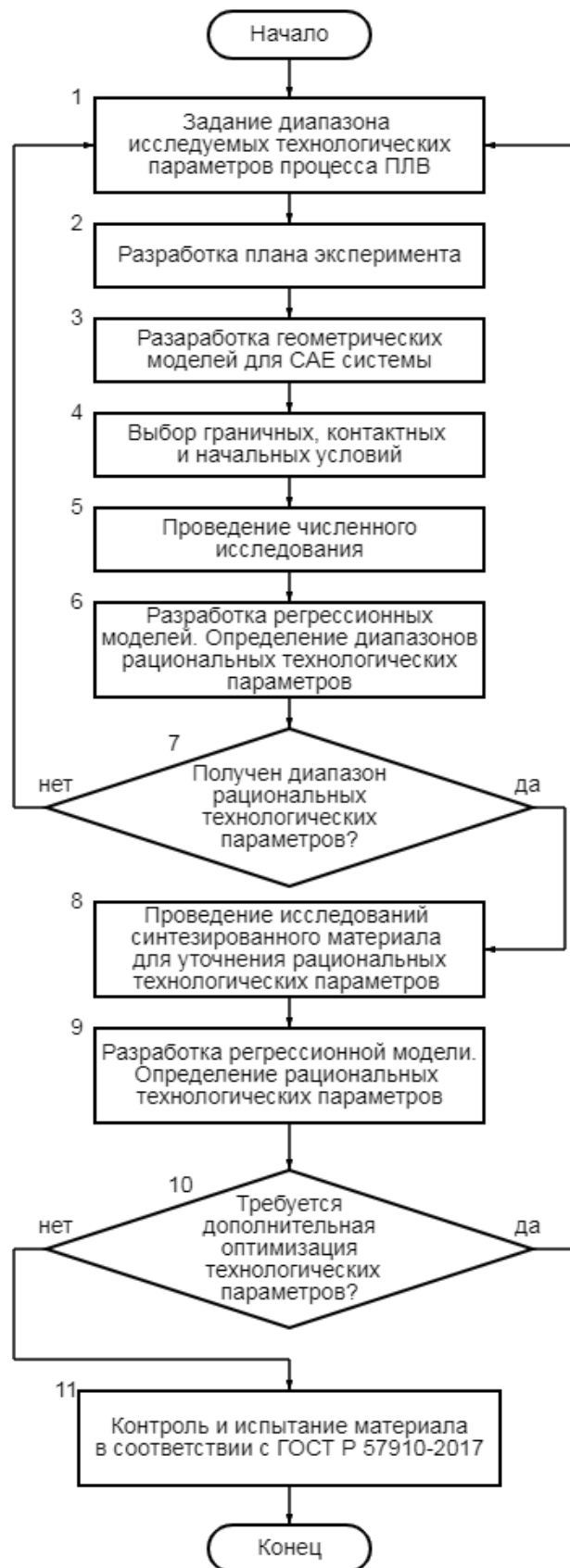


Рисунок 4.4 – Блок–схема алгоритма определения рациональных технологических параметров процесса ПЛВ

Другим действенным способом является предварительная коррекция геометрии заготовки. Так, разработанная электронная геометрическая модель заготовки корректируется в соответствии полученными результатами отклонения реальной уже выращенной заготовки методом ПЛВ [183]. По результатам исследования калибровочных образцов определяются начальные деформации. Затем на основании анализа деформаций, производится коррекция электронной геометрической модели заготовки на величину этих деформаций, взятых с обратным знаком. И уже эта предеформированная электронная графическая модель заготовки используется при формировании УП для аддитивной установки ИЛИСТ-L (поз. 17, рисунок 4.2).

Для обеспечения кроссплатформенности CAD-моделей их исходный формат должен быть представлен в виде STEP-модели. Формат STEP стандарт обмена моделью данных об изделии (Standard for Exchange of Product model data) представляет собой набор стандартов ISO 10303, применяемых в системах компьютерного проектирования и производства CAD\CAM. Генерация стратегии выращивания и траектории движения технологического инструмента, т.е. создание управляющей программы (УП) для роботизированной установки ПЛВ ИЛИСТ-L, является следующей важной стадией подготовки процесса изготовления крупногабаритной заготовки. Во время создания УП определяется последовательность переходов, устанавливаются рациональные технологические параметры и условия работы оборудования, а также разрабатывается логика управления процессом ПЛВ. От качества созданной управляющей программы зависит эффективность и безопасность работы оборудования, а также качество выращенной заготовки. Создание управляющей программы требует глубоких знаний в области программирования технических систем и специфики технологического процесса ПЛВ.

После формирования рабочего файла УП для установки ПЛВ ИЛИСТ-L следует этап изготовления заготовки детали (поз. 18, рисунок 4.2). Данный этап характеризуется подготовкой аддитивной установки к процессу ПЛВ и включает: загрузку УП в контроллер робота; установку и закрепление платформы

построения; заполнение колб дозаторов МПК; заполнение рабочей камеры инертным газом.

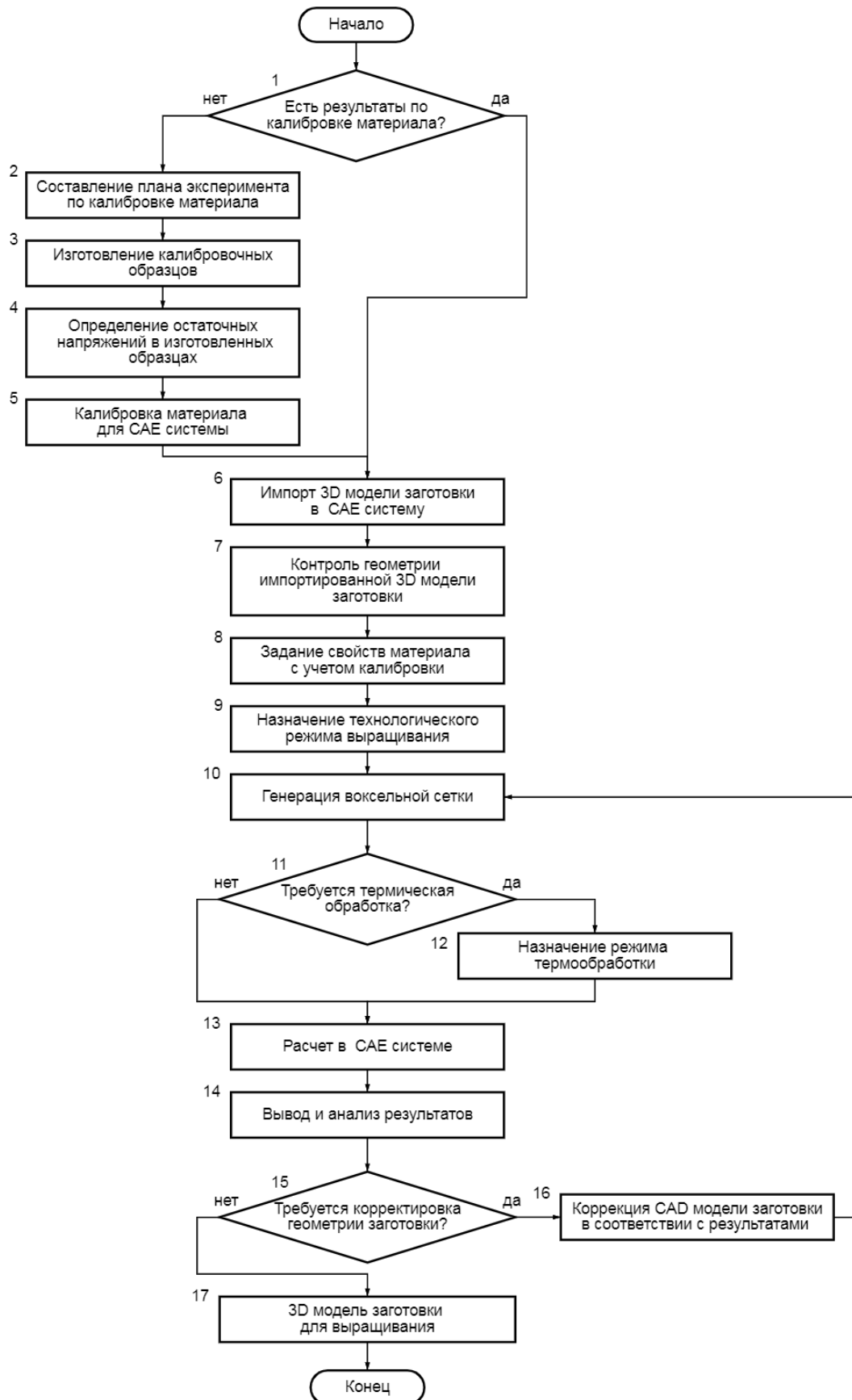


Рисунок 4.5 – Блок-схема алгоритма коррекции заготовки детали

После завершения этапа изготовления производится сбор остатков неиспользованной МПК с помощью промышленного пылесоса, раскрепление платформы для построения с выращенной на ней заготовкой, извлечение последних из рабочей камеры. В соответствии с требованиями технологического процесса заготовка может проходить термическую обработку (поз. 19, рисунок 4.2). Термическая обработка, после процесса ПЛВ, проводится для снятия остаточных напряжений и перед отделением заготовки от платформы построения.

Далее проводится процесс отделение выращенной заготовки от платформы построения (поз. 21, рисунок 4.2). Заготовка может быть отделена от платформы построения одним из способов: с помощью ленточной пилы, угловой шлифовальной машины и абразивных дисков или электроэрозионного проволочного станка. Последней операцией изготовления заготовки методом ПЛВ является контроль (поз. 22, рисунок 4.2). Здесь осуществляется контроль геометрических размеров, в том числе отклонений формы и расположения поверхностей от заданных значений. Если в технических требованиях, указанных на рабочем чертеже детали или в техническом задании, нужно проведение контроля структуры материала на отсутствие дефектов и контроль механических свойств на образцах свидетелях (поз. 28, рисунок 4.2), то изготавливаются образцы свидетели и проводят исследования согласно требованиям.

Финальным этапом методики является этап оформления технологического процесса изготовления заготовки методом ПЛВ (поз. 30, рисунок 4.2). В технологической документации должна быть отражена очередность выполнения процесса ПЛВ, с указанием технологических параметров процесса ПЛВ, используемые основные и вспомогательные материалы и инструменты.

### **4.3 Рекомендации по проектированию геометрических элементов заготовок, получаемых методом ПЛВ**

При проектировании геометрических элементов заготовок, конструктор должен учитывать конкретные характеристики и возможности метода ПЛВ и оборудования, на котором осуществляется процесс. Для роботизированной

установки ПЛВ ИЛИСТ-L, в состав которой, как уже отмечалось, входит шестиосевой робот и двухосевой позиционер, практически нет ограничений по выращиванию элементов заготовок, расположенных под углом. Для получения заготовки с относительно точными и точными геометрическими размерами предпочтительнее использовать механическую обработку, а не изготавливать её непосредственно методом ПЛВ. Эти рекомендации применимы как к отверстиям и полостям, так и к выступающим элементам, таким как ребра жесткости и/или выступы. Данный раздел диссертационной работы посвящен рекомендациям по проектированию геометрических элементов заготовок, получаемых технологией ПЛВ.

### **Проектирование отверстий**

Возможность изготовления отверстия методом ПЛВ зависит от ориентации центральной оси отверстия по отношению к оси технологической головки выращивания. Отверстия с диаметрами 2 мм и менее или отверстия с осями, не совпадающими с осью технологической головки выращивания, рекомендуется выполнять при последующей постобработке.

Роботизированная установка ПЛВ ИЛИСТ-L технически позволяет выполнять отверстия с осями, не совпадающими с осью технологической головки. Однако эта возможность зависит от угла наклона оси отверстия. Также необходимо учитывать порядок выращивания слоев, от которого зависит возможность доступа технологической головки выращивания. Для таких случаев требуется проверка отсутствия столкновения, осуществляемая с помощью модуля верификации в САМ-системе.

### **Проектирование пазов**

При проектировании пазов в стенках или других элементах заготовки следует учитывать, что минимальный размер этих пазов зависит от размера ванны расплава. Попытки создания пазов с размерами, меньшими, чем ванна расплава, могут привести к их заплавлению. При использовании для выращивания процесса ПЛВ в качестве наплавочного материала применяются МПК, которые могут оставаться в пазах и негативно влиять на качество поверхности за счет роста

боковых выступов. Эти выступы возникают в результате закрепления частиц порошка на поверхности, что потребует дополнительной обработки для их удаления.

### **Проектирование полостей**

Выполнять полости в заготовках деталей возможно при осуществлении следующих условий:

- 1) наличия доступа технологической головки к поверхности выращивания;
- 2) наличия отверстий в закрытых полостях с целью удаления из них порошка, попавшего при выращивании, с последующей герметизацией этих полостей;
- 3) отсутствия возможности или затруднения получения элементов и поверхностей внутренних полостей с помощью процессов механической обработки.

### **Толщина стенки**

В процессе ПЛВ минимальная толщина стенки соответствует ширине ванны расплава, которая часто составляет ширину одного наплавленного валика. Для установки ПЛВ ИЛИСТ-L, использующую в качестве материала построения МПК, ширина наплавочного валика материала и минимальная толщина стенки может составлять 1 мм. Толстые стенки можно изготовить любой толщины, при этом необходимо учитывать коэффициент перекрытия между валиками.

## **Выводы по главе 4**

1. Разработана методика и алгоритм проектирования технологического процесса ПЛВ для крупногабаритных заготовок деталей камер сгорания ГТД из жаропрочного сплава ЭП648 методом ПЛВ. Методика проектирования содержит семь этапов, а именно: изучения исходных данных, определения рациональных технологических параметров, проектирования заготовки детали, определения стратегии изготовления заготовки, моделирования процесса изготовления заготовки, постобработки и контроля.
2. Разработанные алгоритмы, позволяют спроектировать крупногабаритные заготовки деталей камер сгорания ГТД, изготавливаемых методом ПЛВ.

Алгоритмы позволяют определить рациональные технологические параметры процесса ПЛВ и вносить необходимые коррективы в электронную геометрическую модель заготовки с целью компенсации действия внутренних напряжений, возникающих в процессе ПЛВ.

3. Разработаны рекомендации по проектированию геометрических элементов заготовок, изготавливаемых технологией ПЛВ.

## ГЛАВА 5 ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ НА ПАО «ОДК-КУЗНЕЦОВ»

Апробация разработанной в диссертационной работе методики проектирования технологических процессов изготовления крупногабаритных заготовок для деталей камеры сгорания ГТД методом ПЛВ была проведена на заготовках, изготавливаемых из жаропрочного сплава на никелевой основе ЭП648: «Кожух наружный камеры сгорания» и «Кожух внутренний камеры сгорания».

В соответствии с разработанной и представленной в главе 4 методикой при проектировании технологических процессов изготовления заготовок деталей «Кожух наружный камеры сгорания» и «Кожух внутренний камеры сгорания» ГТД был выполнен комплекс работ, включающий: проведение анализа технологичности каждой из деталей с целью определения возможности их изготовления технологией ПЛВ; определение стратегии выращивания заготовок, а именно: траектории движения технологического инструмента и условий его безопасного перемещения, задание рациональных технологических режимов и т.д.; проведение технико-экономического обоснования использования технологии ПЛВ для изготовления крупногабаритных заготовок камеры сгорания ГТД.

Реализация алгоритма по определению рациональных технологических параметров сканирования МПК высоколегированного жаропрочного сплава на никелевой основе ЭП648 представлена в главах 2 и 3. Итогом реализации комплексного ТП изготовления заготовок деталей «Кожух наружный камеры сгорания» и «Кожух внутренний камеры сгорания» ГТД стали акты о проведении исследовательских, предварительных и приемочных (в составе технологического двигателя) испытаний, проведенных согласно разработанным программам и методикам испытаний.

### **5.1 Анализ технологичности деталей «Кожух наружный камеры сгорания» и «Кожух внутренний камеры сгорания» ГТД**

Оценка технологичности деталей включает в себя качественную и количественную составляющие. Качественная оценка основывается на характеристиках материала, геометрической форме детали, качестве поверхностей,



размерах и возможных способах изготовления. Количественная оценка включает в себя объективные показатели, такие как коэффициент использования материала, точность обработки, шероховатость поверхностей, трудоёмкость изготовления и технологическая себестоимость. Следует отметить, что при проведении количественной оценки в первую очередь определяются значения этих показателей как для базовой, так и рассматриваемой деталей [5, 13,15].

Рассматриваемые детали камеры сгорания (КС) «Кожух наружный камеры сгорания» (рисунок 5.1) и «Кожух внутренний камеры сгорания» (рисунок 5.2) используются в кольцевой камере сгорания ГТД. Внутренний и наружный кожухи образуют кольцевое пространство, обеспечивающее направление газового потока, в котором расположена кольцевая жаровая труба. Для снижения температуры горелочного газа в кожухах предусмотрена система радиальных (по потоку) отверстий, предназначенных для подмешивания к нему воздуха. Традиционно кожухи камеры сгорания изготавливают из колец путём их раскатки с последующей сваркой и механической обработкой.

Кожухи являются основными элементами камеры сгорания ГТД, обеспечивающими направление газового потока и защиту деталей ГТД от воздействия высоких температур камеры сгорания. Жаровые трубы работают в сложных условиях высокотемпературной и химически активной газовой смеси при повышенном давлении (до 4 МПа) и значительных скоростях движения газа. Во время процесса горения в кольцевой камере сгорания температура продуктов сгорания может достигать 2300 К при значительной неравномерности температурного поля (неравномерность температурного поля газового потока достигает до 100° по окружности и до 70° по радиусу). Детали наружного и внутреннего кожухов КС работают в более легких температурных условиях, однако на них воздействует значительный перепад давления между окружающей средой и внутренней полостью камеры сгорания. В результате взаимодействия с газовым потоком стенки кожухов подвергаются эрозии. При этом для нормальной, долговременной и надежной работы кожухов КС температура стенок не должна превышать 900 °С [26, 27]. Это требование, как уже отмечалось, обеспечивается подмешиванием через систему радиальных отверстий в стенках кожухов

вторичного воздуха, а также применением высоколегированного жаропрочного сплава на никелевой основе.

«Кожух наружный камеры сгорания» (рисунок 5.1) и «Кожух внутренний камеры сгорания» (рисунок 5.2) представляют собой конические цилиндры со сложным контуром с отверстиями, служащими для охлаждения внутренних стенок кожухов. Охлаждающий воздух через отверстия, расположенные в гильзах, поступает в кольцевые щели, из которых выходит в виде пристеночной защитной пленки.

Одной из особенностей технологии ПЛВ, заключающейся в послойном формировании заготовки детали без выращивания дополнительных поддерживающих структур, является изготовление изделия посредством использования двухосевого позиционера. Заготовки и сами детали «Кожух наружный камеры сгорания» и «Кожух внутренний камеры сгорания» представляют собой осесимметричные тела вращения и их выращивание будет происходить при вращении позиционера и его наклона на необходимые углы.

## **5.2 Разработка стратегии изготовления крупногабаритных заготовок камер сгорания ГТД**

Изготовление заготовок деталей КС «Кожух наружный камеры сгорания» и «Кожух внутренний камеры сгорания» ГТД производилось на аддитивной установке ПЛВ ИЛИСТ-L (рисунок 5.3). Установка позволяет изготавливать заготовки деталей диаметром и высотой соответственно до 1300 мм и 600 мм и массой до 490 кг.

Для осуществления выращивания заготовок деталей «Кожух наружный камеры сгорания» и «Кожух внутренний камеры сгорания», были созданы технологические модели заготовок и проведено их разбиение на простые элементы: цилиндрические и/или конические поверхности; фланцы. Технологические модели заготовок деталей «Кожух наружный камеры сгорания» и «Кожух внутренний камеры сгорания» разделены соответственно на пять и семь простых элементов. Разделение технологических моделей заготовок показана на рисунке 5.4.

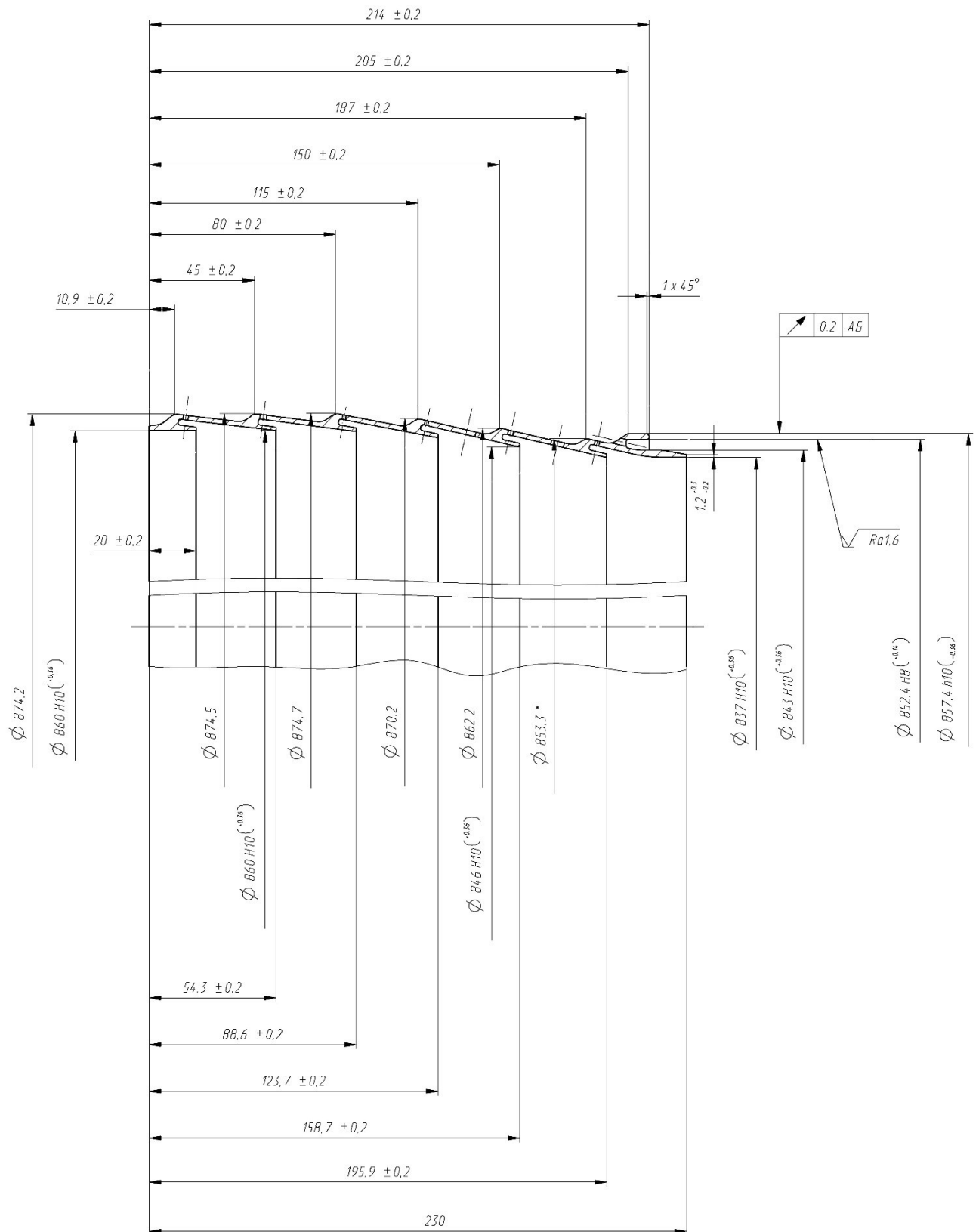


Рисунок 5.1 – Эскиз детали «Кожух наружный камеры сгорания»

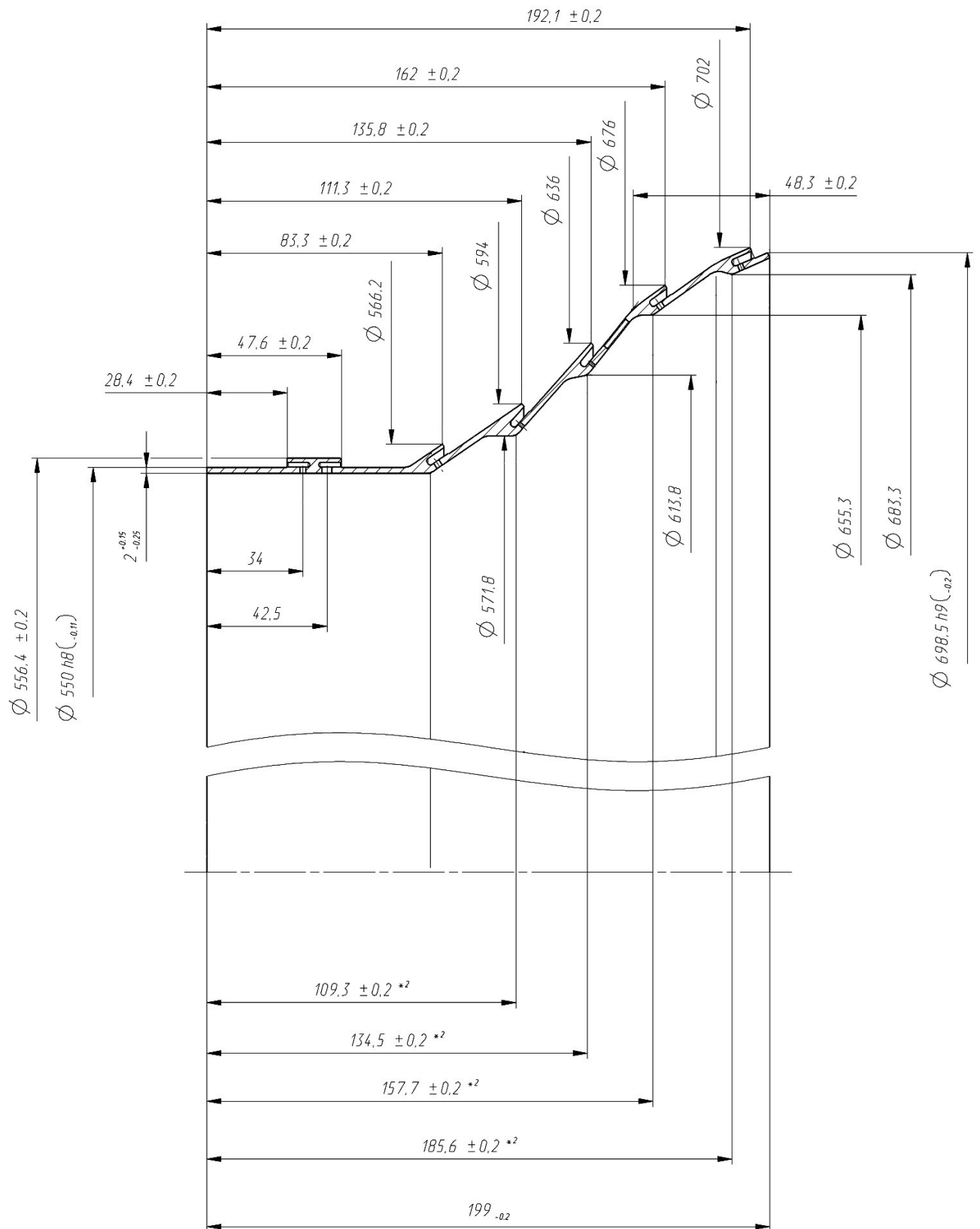


Рисунок 5.2 – Эскиз детали «Кожух внутренний камеры сгорания»



Рисунок 5.3 – Аддитивная установка ПЛВ ИЛИСТ-L

Так как разработка стратегии изготовления заготовок деталей аналогична, то для удобства рассмотрим её на примере заготовки детали «Кожух внутренний камеры сгорания».

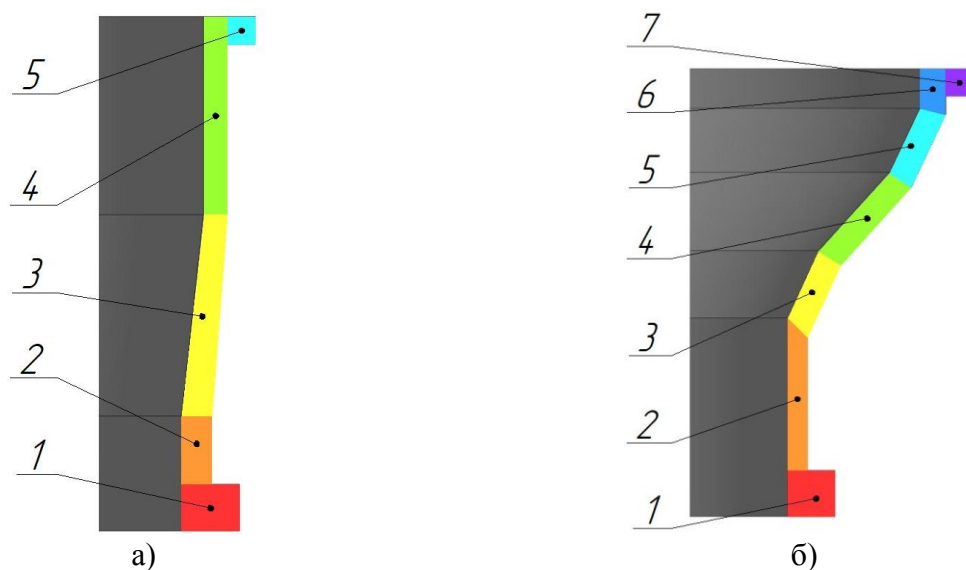


Рисунок 5.4 – Части технологических моделей «Кожух наружный камеры сгорания» (а) и «Кожух внутренний камеры сгорания» (б) после проведения декомпозиции

Первый элемент декомпозиции представляет собой кольцо прямоугольного сечения, которое, в свою очередь, состоит из трех элементов: технологический припуск (а), нижнего технологического фланца (б) и элемента заготовки (в) (рисунок 5.5).

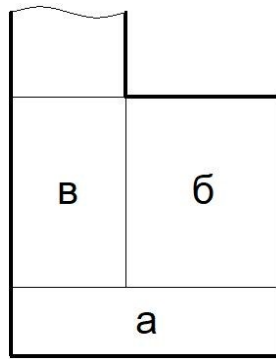


Рисунок 5.5 – Структурный состав первого элемента заготовки

Для обеспечения лучшей адгезии между платформой построения и выращиваемой заготовкой, нижние слои наплавляются на особых режимах. Так, первые два слоя наплавлялись при двухкратном превышении объемной плотности энергии, а третий и четвертый слои – с полуторным значением расчетной объемной плотности энергии. Данный прием позволяет перемешать материалы платформы построения и заготовки и повысить глубину проплавления платформы построения, тем самым увеличив площадь контакта приплавляемых частей. Технологические фланцы необходимы для крепления заготовки на металлорежущем оборудовании при последующей постобработке и в дальнейшем удаляются.

Учитывая, что заготовка детали имеет осесимметричную форму, для снижения погрешностей при выращивании валика сопло установки остается неподвижным, а рабочее движение осуществляется посредством поворота позиционера на  $360^\circ$ . После завершения наплавки валика, рабочий инструмент выполняет отвод и совершает перемещение в радиальном направлении на величину смещения, равную 1,67 мм, по ширине валика. Такая последовательность действий производится до окончания выращивания элемента под номером 2.

Как видно из рисунка 5.4 б, осевое сечение элемента 2 представляет собой прямоугольную трапецию с острым углом в верхней части. Такое сечение выбрано с целью создания опорной поверхности, необходимой для выращивания последующего 3-го элемента, формируемого при наклонном расположении сопла установки (рисунок 5.6). Наклон сопла необходим для предотвращения сваливания ванны расплава. Следует отметить, что направление выращивания 3-го элемента

сонаправлено с его образующей и перпендикулярно наклонной опорной поверхности. При выращивании заготовки нужно изменять угол наклона рабочего инструмента (сопла) и/или позиционера для обеспечения качественного наплавления материала на заготовку. Аналогичным образом выращиваются 4, 5 и 6-ой элемент заготовки.

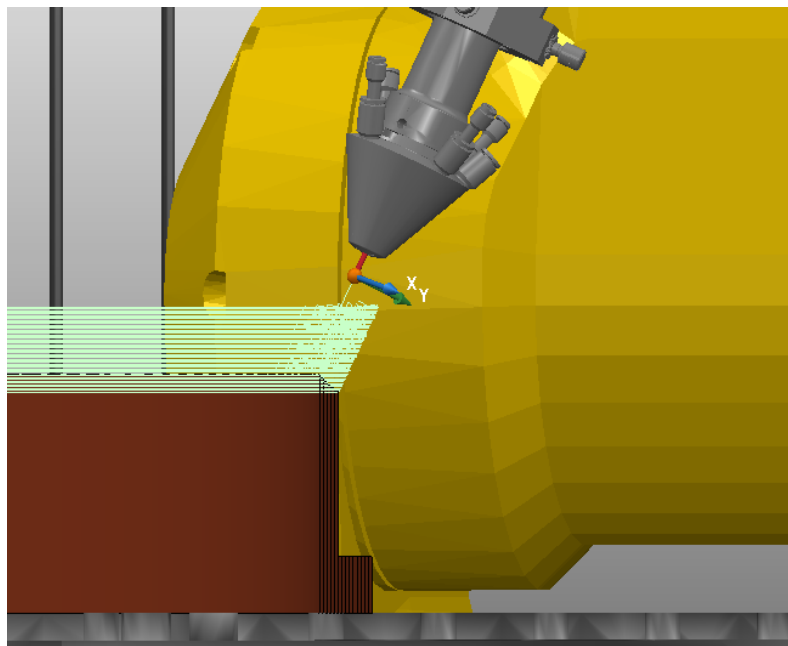


Рисунок 5.6 – Ориентация сопла при отработке третьего элемента заготовки

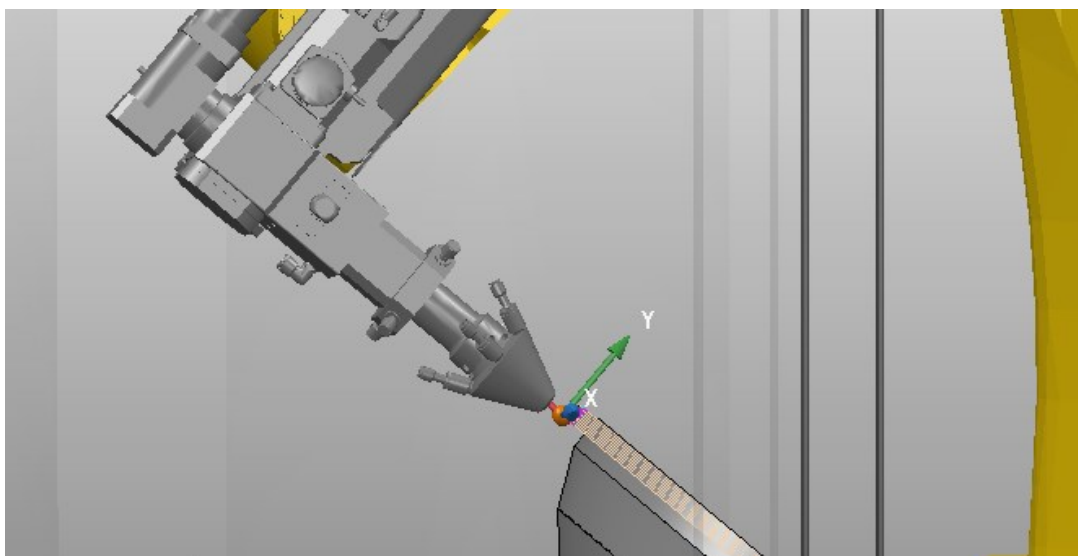


Рисунок 5.7 – Ориентация сопла и заготовки при изготовлении верхнего технологического фланца

Верхний технологический фланец, элемент заготовки 7 (рисунок 5.4, б), выращиваются при угловой ориентации сопла и позиционера с заготовкой (рисунок 5.7).

Такое положение, объясняется снижением вероятности попадания порошка на защитное стекло лазера. Загрязнение стекла может привести к выходу из строя технологической головки и аварийной остановке аддитивной установки.

### **5.3 Технико-экономическое обоснование выбора технологии ПЛВ для получения крупногабаритных заготовок камер сгорания ГТД**

При разработке технологических процессов для производства деталей для газотурбинных двигателей необходимо стремиться к сокращению затрат времени и ресурсов. В связи с этим целесообразно использовать новые производственные процессы и технологии, включая и технологию ПЛВ для получения заготовок.

Современное высокопроизводительное оборудование и инструменты необходимые для его оснащения и работы могут стоить в несколько раз дороже, чем стоимость традиционного технологического оборудования и инструмента. Однако, как показывает практика, при оценке экономической эффективности внедрения такого оборудования, оснастки и инструмента, следует учитывать не только их стоимость, но то, насколько они способны повысить производительность труда и обеспечить гибкость производства.

Из анализа технологического процесса изготовления детали следует, что заготовки деталей КС «Кожух наружный камеры сгорания» и «Кожух внутренний камеры сгорания» ГТД изготавливаются из жаропрочного сплава на никелевой основе ЭП648. На данном этапе проводится предварительный расчет необходимого количества МПК, более точные расчеты будут возможны только после создания окончательных 3D-моделей изготавливаемых заготовок деталей.

### **Расчет стоимости изготовления крупногабаритных заготовок кожухов ГТД технологией ПЛВ**



Учитывая специфику функционирования установки ИЛИСТ-L, работающей по технологии ПЛВ, для построения заготовки детали необходимо иметь МПК примерно на 30-40 % больше по сравнению с массой самой заготовки. Избыточная часть порошка не участвует в выращивании основного материала заготовки. Это та часть материала (технологический запас), которая в сумме идет на выращивание технологического припуска, не попала в зону расплава и высыпалась при холостых перемещениях технологического инструмента. Кроме того, в расчетах необходимо также учесть минимальное количество порошка, которое должно находиться в колбе для МПК в установке ИЛИСТ-L, что приблизительно составляет 0,3 кг. Вместе с тем необходимо рассчитать непосредственное количество МПК, который пойдет на выращивание заготовки и технологические нужды. Общее количество жаропрочного порошка марки ЭП648, необходимого для выращивания заготовок кожухов камеры сгорания ГТД, представлено в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Количество МПК, необходимой для выращивания заготовок

| Номер п/п | Наименование заготовки             | Вес заготовк и, кг | Технологически й запас МПК, кг | Количество МПК в системе, кг | Всего на заготовку, кг | Возвратный материал, кг |
|-----------|------------------------------------|--------------------|--------------------------------|------------------------------|------------------------|-------------------------|
| 1.        | «Кожух наружный камеры сгорания»   | 93                 | 27,9                           | 0,3                          | 121,2                  | 28,2                    |
| 2.        | «Кожух внутренний камеры сгорания» | 61                 | 18,3                           | 0,3                          | 79,6                   | 18,6                    |
| 3.        | ИТОГО:                             | 154                | 46,2                           | 0,6                          | 200,8                  | 46,8                    |

Из расчета следует, что количество МПК, необходимой для выращивания заготовок деталей «Кожух наружный камеры сгорания» и «Кожух внутренний камеры сгорания» составляет 121,2 кг и 79,6 кг соответственно. Всего для выращивания заготовок необходимо иметь 200,8 кг МПК. Однако, если учесть особенности процесса ПЛВ, то после изготовления заготовок неиспользованная часть МПК за исключением 3%, которая отбраковывается при повторном просеивании, может быть использована вновь при выращивании следующего изделия. С учетом ранее сказанного, необходимое количество МПК для изготовления заготовок составит 177,8 кг.

### **Время изготовления детали**

Одним из основных параметров, определяющих время изготовления заготовок по технологии ПЛВ, является ширина валика наплавки. Изготовление заготовок деталей «Кожух наружный камеры сгорания» и «Кожух внутренний камеры сгорания» осуществляется при ширине валика наплавки, равной 2,5 мм. Указанное значение определено на основе использования разработанной математической модели плавления МПК лазерным источником. Учитывая ранее изложенное, время выращивания заготовок деталей «Кожух наружный камеры сгорания» и «Кожух внутренний камеры сгорания» составит 117 ч 22 мин и 93 ч 51 мин соответственно. Расчет стоимости изготовления заготовок деталей «Кожух наружный камеры сгорания» и «Кожух внутренний камеры сгорания» приведен в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Расчет стоимости изготовления заготовок деталей «Кожух наружный камеры сгорания» и «Кожух внутренний камеры сгорания»

| Материал заготовок: ЭП648                            |                            |            |                |
|------------------------------------------------------|----------------------------|------------|----------------|
| «Кожух наружный камеры сгорания»                     |                            |            |                |
| Наименование единицы затрат                          | Стоимость за единицу, руб. | Количество | Сумма, руб.    |
| МПК на заготовку, кг                                 | 15 000,00 Р                | 121,2      | 1 818 000,00 Р |
| МПК в отход 3%, кг                                   | 15 000,00 Р                | 3,64       | 54 600,00 Р    |
| Платформа построения, кг                             | 193,60 Р                   | 123        | 23 812,80 Р    |
| Время работы оборудования. Т <sub>о</sub> , мин      | 90,00 Р                    | 7 042      | 633 780,00 Р   |
| Вспомогательное время Т <sub>в</sub> , мин           | 4,00 Р                     | 120        | 480,00 Р       |
| Штучно-калькуляционное время Т <sub>шт-к</sub> , мин | -                          | 7 162      | 608 770,00 Р   |
| Технологическая себестоимость, руб                   | 3 139 442,80 Р             |            |                |
| «Кожух внутренний камеры сгорания»                   |                            |            |                |
| МПК на заготовку, кг                                 | 15 000,00 Р                | 56,6       | 849 000,00 Р   |
| МПК в отход 5%, кг                                   | 15 000,00 Р                | 1,7        | 25 500,00 Р    |
| Платформа построения, кг                             | 193,60 Р                   | 52         | 10 067,20 Р    |
| Время работы оборудования. Т <sub>о</sub> , мин      | 90,00 Р                    | 5 631      | 506 790,00 Р   |
| Вспомогательное время Т <sub>в</sub> , мин           | 4,00 Р                     | 120        | 480,00 Р       |
| Штучно-калькуляционное время Т <sub>шт-к</sub> , мин | -                          | 5 751      | 488 835,00 Р   |
| Технологическая себестоимость, руб                   | 1 880 672,20 Р             |            |                |
| ИТОГО за две заготовки:                              | 5 020 115,00 Р             |            |                |

Как видно из таблицы 5.2, суммарная стоимость изготовления заготовок деталей «Кожух наружный камеры сгорания» и «Кожух внутренний камеры сгорания» по технологии ПЛВ составляет 5 020 115,00 рублей.

#### 5.4 Технологическая подготовка изготовления заготовок

На основании блок-схемы алгоритма, представленного на рисунке 4.3, были спроектированы чертежи заготовок для деталей «Кожух наружный камеры сгорания» и «Кожух внутренний камеры сгорания». При разработке заготовок особое внимание было уделено требованиям к точности размеров, шероховатости и волнистости поверхностей. Для поверхностей, точность размеров которых невозможно достичь с помощью технологии ПЛВ были добавлены припуски на последующую механическую обработку. Величина этих припусков составила по 4 мм на сторону. Для торцевой поверхности, расположенной непосредственно на платформе построения, добавили технологический припуск необходимый для отделения от платформы построения. В нашем случае для каждой из выращиваемых заготовок деталей он составляет 15 мм. Величина технологического припуска определена экспериментально и успешно апробирована в процессе разработки ТП и последующего изготовления заготовок. На верхний торец заготовок добавлены технологические фланцы, которые необходимы для закрепления заготовки на металлорежущем оборудовании при их последующей обработке. Эскизы заготовок деталей «Кожух наружный камеры сгорания» и «Кожух внутренний камеры сгорания» представлены на рисунке 5.8.

К заготовкам деталей «Кожух наружный камеры сгорания» и «Кожух внутренний камеры сгорания» ГТД предъявляются следующие технические требования:

- \* размеры для справок;
- заготовку изготовить и контролировать по 3D-модели;
- допустимые отклонения заготовки от их номинального положения по IT

17/2.

Материал заготовок деталей – жаропрочный сплав ЭП648.

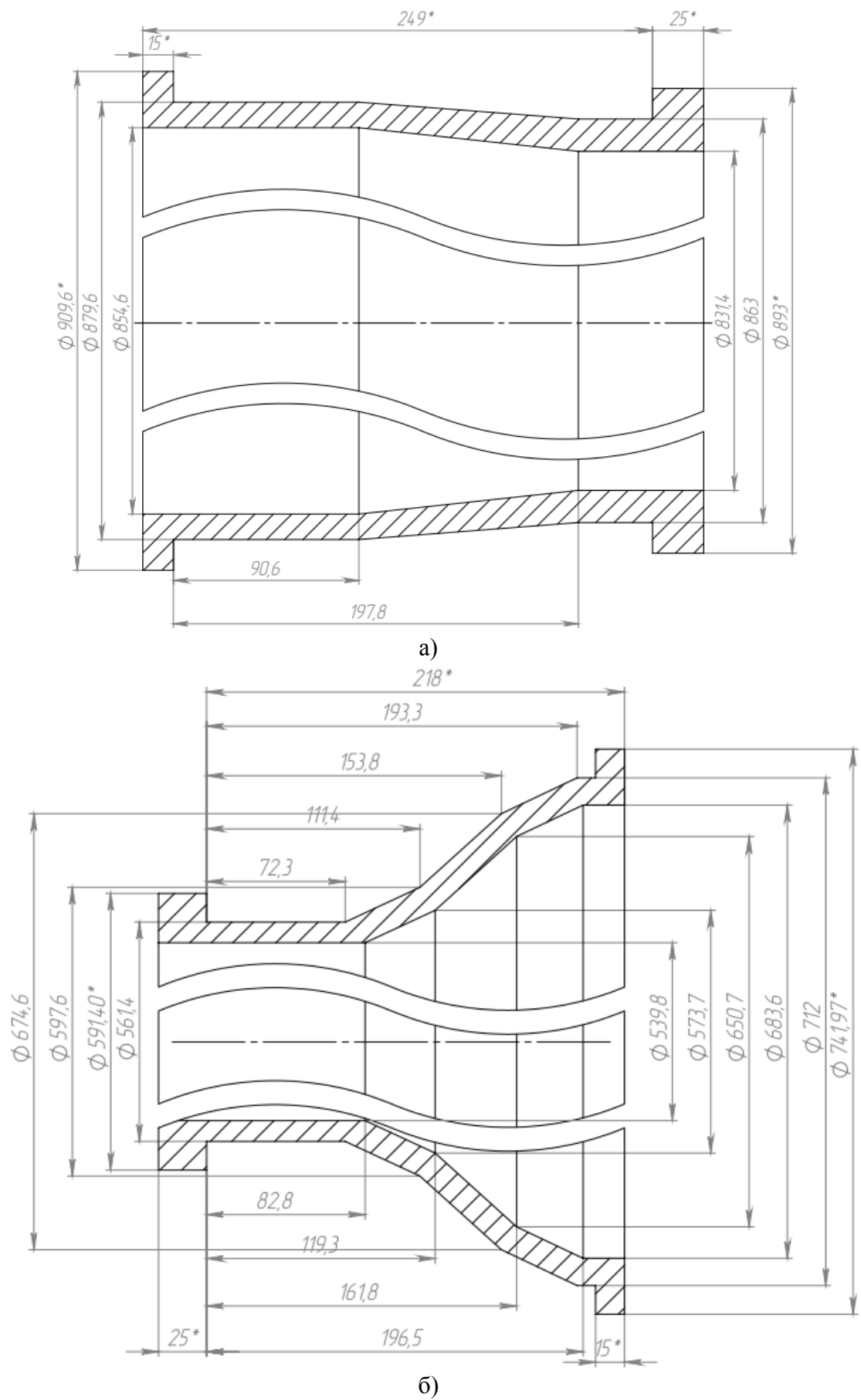


Рисунок 5.8 – Эскизы заготовок деталей:

а) «Кожух наружный камеры сгорания» б) «Кожух внутренний камеры сгорания»

Изготовление заготовок деталей КС «Кожух наружный камеры сгорания» и «Кожух внутренний камеры сгорания» ГТД, как уже отмечалось ранее, производилось на аддитивной установке ПЛВ ИЛИСТ-L (рисунок 5.3).

После построения 3D-моделей заготовок в САД-модуле для их последующей доработки было использовано программное обеспечение Autodesk Power Shape, которое позволило заменить твердые тела на срединные поверхности. Далее были созданы управляющие программы посредством использования программного обеспечения PowerMill, имеющего постпроцессор для аддитивной роботизированной установки ПЛВ ИЛИСТ-L.

Процесс построения траекторий выращивания заготовок достаточно трудоёмкий. Для создания управляющих программ с использованием программного обеспечения PowerMill применяются следующие стратегии:

- чистовая обработка поверхности;
- обработка с постоянной Z;
- аддитивный модуль Netfabb.

При проектировании управляющих программ выращивания заготовок деталей «Кожух наружный камеры сгорания» и «Кожух внутренний камеры сгорания» ГТД использовалась стратегия: «Чистовая обработка поверхности». Следует отметить, что с целью уменьшения термических напряжений в начале и конце контура точки старта были разнесены. Полученные траектории движения инструмента верифицировались с помощью симуляции процесса движения наплавочной головки. После чего эти траектории оптимизировались с целью сокращения холостых перемещений инструмента при соблюдении необходимой послойной структуры роста заготовок. Оптимизация технологических переходов существенно сокращает время производства заготовок, затраты МПК и защитного газа. Значения технологических параметров выращивания были выбраны на основании результатов исследований, приведенных в главах 2 и 3. После назначения технологических параметров выращивания был сформирован рабочий

файл управляющей программы для робота, который далее был передан в контроллер робота, расположенный в аддитивной установке ИЛИСТ-L.

После получения МПК от производителя проводится входной контроль. В первую очередь МПК жаропрочного сплава на никелевой основе ЭП648 должна соответствовать заявленным характеристикам по химическому составу, фракционному составу, по отсутствию дефектов и инородных включений. Для проверки качества МПК, рекомендуется проводить входной контроль, в результате которого составляется протокол входного контроля МПК. В этом протоколе указывается:

- фактический химический состав порошка;
- физико-технологические свойства порошка (размер фракций, форма частиц, текучесть, отсутствие/наличие дефектов порошка).

После проведения входного контроля и анализа полученных результатов принимается решение о пригодности или непригодности данной МПК для использования в процессе ПЛВ.

Перед началом процесса ПЛВ следует подготовить платформу построения для выращивания. Так как заготовки деталей крупногабаритные, то, следовательно, в процессе выращивания будут иметь место значительные деформации. Поэтому для минимизации деформаций в качестве платформы построения для выращивания использовался металлический лист из Ст 3 толщиной 20 мм. Для заготовки детали «Кожух наружный камеры сгорания» диаметр платформы построения составил  $1000 \pm 1$  мм, а для заготовки «Кожух внутренний камеры сгорания» величина диаметра равнялась  $600 \pm 1$  мм. Крепление платформы построения к столу позиционера осуществлялось через выполненные в них отверстия диаметром 20 мм (рисунок 5.9). Платформы построения для выращивания перед установкой на стол позиционера зачищаются до металлического блеска абразивным кругом, после чего протираются ацетоном по всей поверхности.

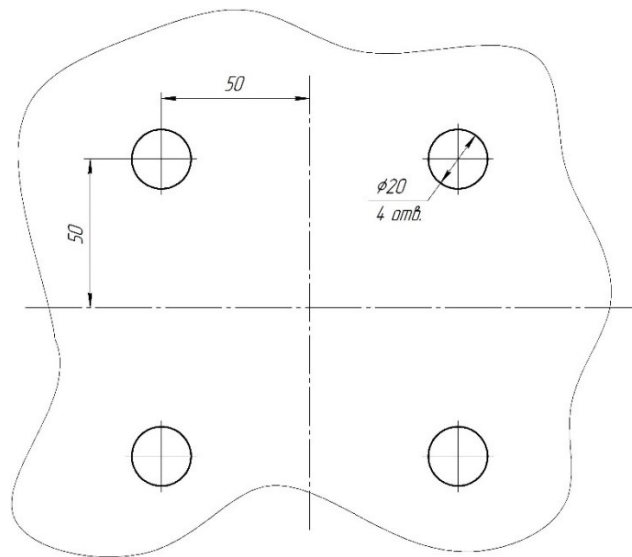


Рисунок 5.9 – Эскиз расположения отверстий в платформе построения для её крепления к столу позиционера

### 5.5 Изготовление крупногабаритных заготовок деталей ГТД

Перед выращиванием заготовок необходимо провести процедуру подготовки установки ПЛВ ИЛИСТ-L к работе, для чего выполнить следующие операции:

- 1 Перенести управляющие программы в контроллер робота.
- 2 Проверить уровень воды в охлаждающем чиллере.
- 3 Очистить колбы питателя от МПК (при необходимости).
- 4 Подготовить нужное количество МПК для выращивания.
- 5 Установить платформу построения на стол позиционера (симметрично относительно выращиваемой заготовки). Затем предварительно закрепить ее и проверить правильность установки путем прогонки нескольких слоев.
- 6 Закрепить платформу построения на столе позиционера окончательно.
- 7 Обезжирить всю поверхность платформы построения ацетоном или обезжиривателем.
- 8 Проверить чистоту защитного стекла на головке.
- 9 Проверить соосность сопла и излучения, при необходимости поднастроить.
- 10 Проверить настройку фокусного расстояния: должно быть 11 мм. При необходимости поднастроить.

11 Перед стартом выращивания изделия измерить коэффициент захвата порошка (КЗП) (если  $KЗП < 65\%$  – заменить инжекторы на новые и повторить измерение).

12 Убедиться, что в строчке Leader Frame установлены номинальные значения.

13 Установить необходимые значения диаметра пучка на коллиматоре.

14 Включить подачу аргона из криобака.

15 Включить компрессор.

16 Включить вытяжку.

17 Положить в кабину и шлюз необходимые инструменты:

- иголку для чистки сопла (в кабину);
- набор шестигранников (в кабину);
- картридж с защитным стеклом (в шлюз);
- дополнительные защитные стекла (в шлюз);
- пластину из нержавеющей стали для очистки сопла от налипания (в кабину);
- штангенциркуль (в кабину);
- щетку с металлической щетиной (в кабину).

18 Установить поддоны для сбора порошка.

19 Выставить все необходимые регистры технологических параметров выращивания в программе.

20 Обнулить значение «Количество израсходованного порошка».

21 Засыпать необходимый порошок в колбы питателя.

22 Перед запуском процесса ПЛВ, обязательно произвести отработку УП на холостом ходу (без включения лазера и подачи МПК).

23 В случае корректного выполнения УП, запустить процесс ПЛВ

24 Закрыть и заблокировать дверцу кабины и начать заполнение кабины для выращивания, аргоном.

25 Во время заполнения кабины аргоном, для создания защитной атмосферы, определить тарировочный коэффициент.



26 Перед запуском программы включить «анализ».

27 При достижении уровня кислорода в кабине менее 500 ppm – запустить процесс выращивания заготовки (рисунок 5.10).

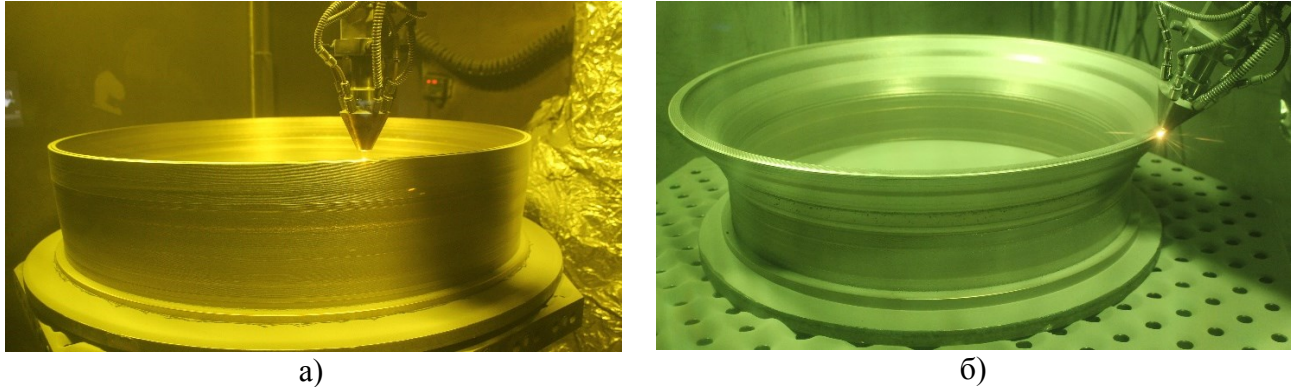


Рисунок 5.10 – Процессы выращивания кожух наружный камеры сгорания (а) и кожух внутренний камеры сгорания (б)

В процессе выращивания заготовок они подвергаются воздействию многочисленных циклов термического нагружения, в их теле происходит усадка, формируются остаточные напряжения, приводящие к деформации платформы построения и самих заготовок. Несмотря на закладывание в технологическую модель усадочного коэффициента и прогнозирования возможных деформаций, для подтверждения правильности формируемой геометрии, например, заготовки детали «Кожух внутренний камеры сгорания» после отработки шестого элемента (рисунок 5.4 б) проводится проверка выставления начальной точки седьмого элемента (рисунок 5.4, б) относительно предыдущего (рисунок 5.11).

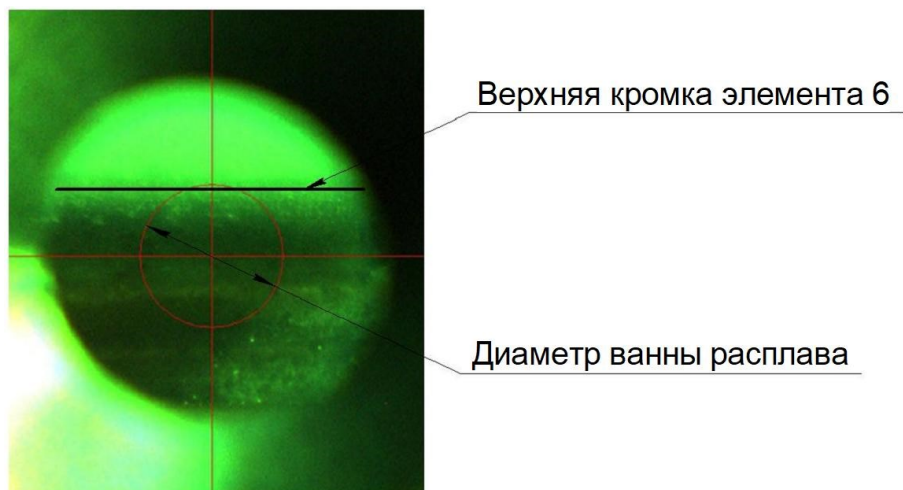


Рисунок 5.11 – Проверка начальной точки

Как видно из рисунка 5.11, уровень ванны расплава находится ниже верхней кромки элемента 6 (рисунок 5.4 б), что подтверждает адекватность расчетов в САЕ-системе и значения коэффициента усадки. Процесс выращивания фланца показан на рисунке 5.12.

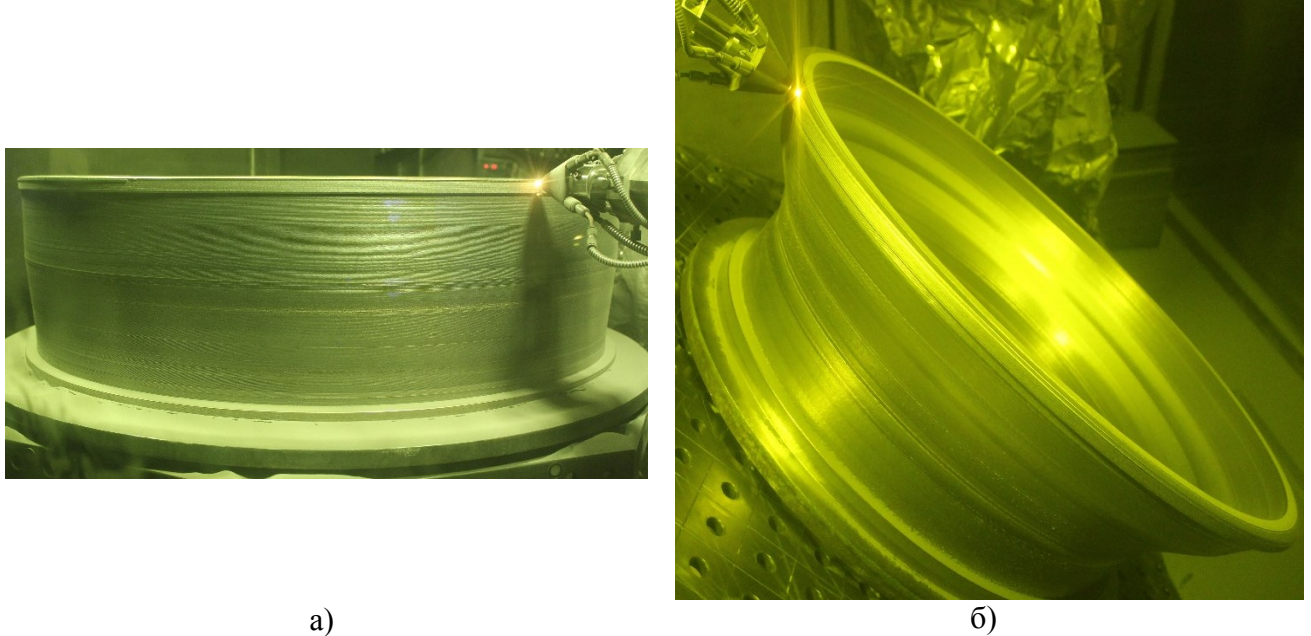


Рисунок 5.12 – Процесс выращивания верхнего фланца на заготовках кожухе наружной камеры сгорания (а) и кожухе внутренней камеры сгорания (б)

После окончания процесса выращивания необходимо провести следующие работы:

- 1 Выключить подачу газов и МПК и перевести переключатель лазера в положение «0».
- 2 Остановить анализ.
- 3 Перевести кабину установки в режим вентиляции.
- 4 Во время вентиляции:
  - записать результаты анализа в журнал выращивания;
  - заполнить паспорт на заготовку;
  - записать «Перечень ошибок и исправлений», которые имели место в процессе выращивания и которые следует исправить в следующей итерации.
- 5 После вентиляции, провести визуальный осмотр и подписать маркером номер выращенной заготовки.

6 Собрать МПК в банку (банки), сделать пометку маркером на банке «Н/П» (порошок не просеян) для чего высыпать остатки МПК со стола на поддоны, наклоняя и вращая стол (если это возможно).

7 Распечатать необходимое количество этикеток и наклеить на банку (банки) с возвратной МПК.

8 Закрыть кабину и сдуть пистолетом с подведенным к нему воздухом остатки порошка с робота, выращенной заготовки, шлюза, изнутри стола через отверстия и с его поверхности. Оставить кабину закрытой на 5-10 минут для вентилирования взвеси порошка.

9 Почистить кабину с помощью пылесоса.

10 Достать выращенную заготовку из кабины.

11 Высыпать оставшийся внутри заготовки МПК.

12 Взвесить заготовку с платформой построения и собранную МПК.

13 Заполнить раздел «КИМ» в паспорте заготовки.

14 Просеять собранную МПК; убрать с банки (банок) пометку «Н/П»; записать приход и движение МПК в ведомость и отнести на склад.

15 Замерить КЗП трубок после выращивания и записать результаты в паспорт заготовки.

Выращенные заготовки представлены на рисунке 5.13. Заключительным этапом изготовления заготовок является контроль геометрии выращенной заготовки при помощи лазерного 3D-сканера ScanForm L5.



а)



б)

Рисунок 5.13 – Выращенные заготовки «Кожух наружный камеры сгорания» (а) и «Кожух внутренний камеры сгорания» (б)

Таким образом, разработаны и представлены технологические процессы прямого лазерного выращивания крупногабаритных заготовок деталей «Кожух наружный камеры сгорания» и «Кожух внутренний камеры сгорания» ГТД. Процесс ПЛВ является одним из методов аддитивных технологий и предназначен для изготовления заготовок деталей высокого качества, он обеспечивает экономию времени и средств, повышение производительности производства и подходит для промышленного применения в различных отраслях. Разработанный процесс аддитивного лазерного выращивания открывает новые возможности для создания инновационных и качественных заготовок деталей.

Разработанные ТП изготовления крупногабаритных заготовок деталей «Кожух наружный камеры сгорания» и «Кожух внутренний камеры сгорания» ГТД входят в состав комплексной технологии аддитивного производства деталей и узлов горячей части промышленных газотурбинных двигателей, создаваемой в рамках выполнения совместного с ПАО ОДК Кузнецов комплексного проекта по договору №00826 от 24.04.2021 г. «Организация высокотехнологичного производства промышленных ГТД с интеллектуальной системой конструкторско-технологической подготовки для повышения функциональных характеристик» (Соглашение о предоставлении гранта № 075-11-2021-042 от 24.06.2021 г.). ТП ПЛВ прошли предварительные испытания с присвоением литеры «О» и приемочные испытания в составе технологического двигателя на ПАО ОДК Кузнецов с присвоением литеры «О1». Испытания проводились согласно разработанным программе и методике соответствующих испытаний. Разработанные ТП изготовления крупногабаритных заготовок деталей «Кожух наружный камеры сгорания» и «Кожух внутренний камеры сгорания» ГТД представлены в приложении А. Фотографии изготовленных деталей «Кожух наружный камеры сгорания» и «Кожух внутренний камеры сгорания» по комплексному технологическому процессу, включающему ТП ПЛВ, ТП термической и механической обработки представлены на рисунках 5.14 и 5.15.





Рисунок 5.14 – Деталь «Кожух внутренний камеры сгорания»



Рисунок 5.15 – Деталь «Кожух наружный камеры сгорания»

### **Выводы по главе 5**

1. Проведена апробация разработанной методики проектирования ТП ПЛВ крупногабаритных заготовок на примере заготовок деталей «Кожух наружный камеры сгорания» и «Кожух внутренний камеры сгорания» ГТД. В процессе апробации: проведен технологический анализ деталей для оценки возможности их изготовления по технологии ПЛВ; представлено технико-экономическое обоснование; отражены этапы декомпозиции заготовок и назначения припусков; назначены технологических параметры выращивания для жаропрочной МПК марки ЭП648; выполнено выращивание заготовок.

2. Проведены предварительные испытания и приемочные испытания изготовленных изделий в составе технологического двигателя на стенде ПАО ОДК Кузнецов. По результатам контроля деталей «Кожух наружный камеры сгорания» и «Кожух внутренний камеры сгорания», установлено, что заготовки деталей, полученные методом ПЛВ жаропрочной МПК марки ЭП648, в состоянии обеспечить работоспособность КС ГТД. После окончания испытаний ГТД на стенде и его дефектации на поверхности кожухов сколов, трещин и короблений выявлено не было.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлено решение актуальной научно-технической задачи в области авиационного двигателестроения, направленной на снижение трудоёмкости и повышения производительности труда при производстве ГТД за счёт разработки ТП изготовления крупногабаритных заготовок деталей авиационных ГТД технологией ПЛВ из жаропрочных МПК. В процессе выполнения работы были получены следующие результаты:

1. Разработана аналитическая математическая модель взаимодействия лазерного излучения и МПК для процесса ПЛВ, позволяющая выполнить численное исследование технологических параметров при выращивании заготовок из различных МПК, отличающаяся от известных решений постановкой задачи учёта полноты плавления МПК вне зоны ванны расплава.

2. Определены диапазоны рациональных технологических параметров процесса ПЛВ заготовок из МПК жаропрочного никелевого сплава ЭП648, гарантированно обеспечивающие заданный комплекс физико-механических и химических свойств для выращенного материала: мощность лазерного излучения, 1800-2000 Вт; расход МПК, 20-31 г/мин; скорость выращивания 20-30 мм/с.

3. Исследовано влияние основных технологических параметров выращивания и параметров термической обработки на механические свойства (предел прочности, предел текучести, относительное удлинение и твёрдость), а также на формирование геометрии, структуры и трещинообразование наплавляемого жаропрочного сплава ЭП648. Получены регрессионные модели влияния мощности лазерного излучения на предел прочности при растяжении, относительное удлинение и твёрдость образцов до и после термообработки. На основе статистической обработки данных определены рациональные технологические параметры: мощность лазера – 2000 Вт, скорость выращивания – 25 мм/с, расход МПК – 26,6 г/мин, технологическая пауза – 40 с, обеспечивающие максимальную прочность и требуемое качество материала.

4. Исследовано влияние величины расфокусировки лазера на параметры рельефа верхней и боковых поверхностей заготовок, геометрическую точность

получаемых размеров, предложены параметры для оценки качества верхней поверхности и боковых стенок заготовок. Разработана база данных влияния условий ПЛВ на геометрические размеры и микроструктуру образцов из сплава ЭП648, необходимая для проектирования ТП изготовления заготовок камер сгорания ГТД.

5. Разработана методика и на её основе технологический процесс изготовления заготовок деталей «Кожух наружный камеры сгорания» и «Кожух внутренний камеры сгорания» ГТД из жаропрочного сплава ЭП648 методом ПЛВ; выполнено изготовление указанных заготовок.

6. Проведены испытания в составе технологического двигателя на ПАО «ОДК Кузнецов» разработанного ТП изготовления заготовок деталей «Кожух наружный камеры сгорания» и «Кожух внутренний камеры сгорания» ГТД. На основании испытаний установлено, что характеристики изготовленных кожухов из заготовок, полученных ПЛВ полностью соответствуют установленным требованиям, а конструкторская и технологическая документация допущены в серийное производство.

7. Использование технологии ПЛВ при изготовлении заготовок деталей «Кожух наружный камеры сгорания» и «Кожух внутренний камеры сгорания» обеспечило повышение производительности труда в 2,5 раза, снижение трудоёмкости на 1025 н/ч и уменьшение общего веса заготовок на 138,4 кг при обеспечении требований КД.

Перспектива дальнейшего развития темы состоит в совершенствовании ТП изготовления крупногабаритных заготовок деталей ГТД посредством дополнения методики новыми ТП и результатами определения рациональных технологических параметров ПЛВ для различных видов материалов. Перспективным направлением является совершенствование управления параметрами качества заготовок, получаемых технологией ПЛВ, с целью повышения стабильности ТП изготовления деталей ГТД.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабкин, В.И. Развитие авиационных ГТД и создание уникальных технологий / В.И. Бабкин, М.М. Цховребов, В.И. Солонин, А.И. Ланшин // Двигатель. – 2013. – №2 (86). – С. 2-7.
2. А.А. Иноземцев, В.Л. Сандрацкий Газотурбинные двигатели [Текст] / А.А. Иноземцев, В.Л. Сандрацкий. – Пермь: ОАО «Авиадвигатель», 2006–1204 с.
3. Испытания, обеспечение надежности и ремонт авиационных двигателей и энергетических установок: Учеб. пособие / Ю.С. Елисеев, В.В. Крымов, К.А. Малиновский, В.Г. Попов, Н.Л. Ярославцев. – М.: Изд-во МАИ, 2005 – 540 с.: ил.
4. Бондарев, О.Ю. О камерах сгорания современных авиационных двигателей / О.Ю. Бондарев, Ю.А. Тарасенко // журнал «Двигатель». – 2013. – № 5 (89). – С. 10–16.
5. 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.
6. 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. Баумана. – 2011. – С. 4–5.
7. Arunachalam, R., Mannan, M.A., 2000. Machinability of nickel-based high temperature alloys, *Machining Science and Technology*, 4 (1), pp. 127-168, DOI: 10.1080/10940340008945703
8. Гриценко, Е.А. Конвертирование авиационных ГТД в газотурбинные установки наземного применения [Текст] / Е.А. Гриценко, В.П. Данильченко, С.В. Лукачев, В.Е. Резник, Ю.И. Цыбизов – Самара: СНЦ РАН, 2004. – 267 с.
9. Vdovin, R.A. 2019, «Improving the quality of the manufacturing process of turbine blades of the gas turbine engine», *Journal of Physics: Conference Series*.

10. Bi, Z., Qin, H., Dong, Z., Wang, X., Wang, M., Liu, Y., Du, J. & Zhang, J. 2019, «Residual Stress Evolution and Its Mechanism During the Manufacture of Superalloy Disk Forgings», *Jinshu Xuebao/Acta Metallurgica Sinica*, vol. 55, no. 9, pp. 1160–1174.
11. Saleil, J., Mantel, M. & Le Coze, J. 2020, «Stainless steels making: History of production processes developments. Part III. Casting methods, hot and cold forming processes», *Materiaux et Techniques*, vol. 108, no. 1.
12. Евстигнеев, М.И. Изготовление основных деталей и узлов авиадвигателей: учебник для авиационных вузов / М.И. Евстигнеев, И.А. Морозов, А.В. Подзей, А.М. Сулима, И.С. Цуканов – М.: Машиностроение, 1964. – 460 с., ил.
13. Сулима, А.М. Основы технологии производства газотурбинных двигателей: учебник для студентов авиац. спец. вузов / А.М. Сулима, А.А. Носков, Г.З. Серебренников. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1996. – 480 с.: ил
14. Крымов, В.В. Производство лопаток газотурбинных двигателей / В.В. Крымов, Ю.С. Елисеев, К.И. Зудин; под ред. В.В. Крымова. – М.: Машиностроение – Полет, 2002. – 376 с., ил.
15. Технологичность конструкции изделия: Справочник / Ю.Д. Амиров, Т.К. Алферова, П.Н. Волков и др.; под общ. ред. Ю.Д. Амирова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1990 – 768 с.: ил.
16. Unconventional (advanced) manufacturing processes for gas-engine turbine components. 2013 // Research and Innovation URL: <https://trimis.ec.europa.eu/project/unconventional-advanced-manufacturing-processes-gas-engine-turbine-components> [Онлайн] (дата обращения: 13.01.2025).
17. Tillack, D.J., Welding superalloys for aerospace applications. *WELDING JOURNAL-NEW YORK-*, 2007. 86(1): p. 28.
18. Donachie, M.J. and S.J. Donachie, Super alloys – A technical guide second edition ed. 2002: ASM international.
19. Gabb, T. The next generation of high temperature alloys. *JOM* 62, 47 (2010). <https://doi.org/10.1007/s11837-010-0010-1>

20. Sotov, A.V., Agapovichev, A.V., Smelov, V.G., Kokareva, V.V., Dmitrieva, M.O., Melnikov, A.A., Golanov, S.P. & Anurov, Y.M. 2020, «Investigation of the IN-738 super alloy microstructure and mechanical properties for the manufacturing of gas turbine engine nozzle guide vane by selective laser melting», International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 107, no. 5-6, pp. 2525-2535.
21. Amaero – Additive Manufacturing of Aerospace Equipment. [Онлайн] Available at: <https://www.monash.edu/industry/success-stories/amaero> [дата обращения: 13.01.2025].
22. Committee on Propulsion and Energy Systems to Reduce Commercial Aviation Carbon Emissions, Aeronautics and Space Engineering Board, Division on Engineering and Physical Sciences & National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine 2016, «Commercial aircraft propulsion and energy systems research: Reducing global carbon emissions» in Commercial Aircraft Propulsion and Energy Systems Research: Reducing Global Carbon Emissions, pp. 1-122.
23. Tresa M., Pollock and Sammy T. 2006, «Nickel-Based Superalloys for Advanced Turbine Engines: Chemistry, Microstructure and Properties», Journal of Propulsion and Power, vol.22:2, pp. 361-374.
24. Олейник, М.А. Влияние режимов прямого лазерного выращивания на формообразование одиночных валиков и стенок из жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ / М.А. Олейник, А.В. Балякин, Д.Л. Скуратов, И.Н. Петров, А.А. Мешков // Вестник Московского авиационного института. 2022. Т. 29. № 4. С. 243-255. DOI: 10.34759/vst-2022-4-243-255.
25. Hosseini E., Popovich V.A., 2019, «A review of mechanical properties of additively manufactured Inconel 718», Additive Manufacturing, vol. 30, doi.org/10.1016/j.addma.2019.100877.
26. Чигрин, В.С. Конструкция камер сгорания и выходных устройств авиационных ГТД: учебное пособие / В.С. Чигрин, С.Е. Белова. – Рыбинск, РГАТА, 2006. – 75 с.
27. Старцев, Н.И. Конструкция и проектирование камеры сгорания ГТД: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению

подготовки 130200 «Двигатели летательных аппаратов», по специальности 130201 «Авиационные двигатели и энергетические установки» / Н.И. Старцев; Федеральное агентство по образованию, Гос. образовательное учреждение высш. проф. образования «Самарский гос. аэрокосмический ун-т им. С. П. Королева». – Самара: Изд-во СГАУ, 2007. – 119 с. – ISBN 978-5-7883-0673-5.

28. Беляев, В.В. Повышение экологической безопасности ГТУ путем организации малоэмиссионного горения в камерах сгорания ГТД : специальность 05.07.05 «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Беляев Владимир Васильевич. – Самара, 2006. – 150 с.

29. Назарцев, Н.И. Разработка технологии изготовления бесшовных цилиндрических тонкостенных обечаек методом раскатки [Текст] / Н.И. Назарцев, Б.В. Свитов // Стали и сплавы цветных металлов. – Куйбышев, 1974. – С. 84-92.

30. Костышев, В.А. Раскатка колец [Электронный ресурс] / В.А. Костышев, И.Л. Шитарев ; М-во образования Рос. Федерации, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева. – Самара : СГАУ, 2000. – on-line. – ISBN = 5-7883-0097-5.

31. Ковка и штамповка [Текст]. Т. 2. Горячая объемная штамповка / под ред. Е.Н. Семенова. – М.: Машиностроение, 2010. – 719 с.

32. Балякин, А.В. Обзор гибридного аддитивного производства металлических деталей / А.В. Балякин, М.А. Олейник, Е.П. Злобин, Д.Л. Скуратов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2022. – Т. 21, No 2. – С. 48-64. – DOI: 10.18287/2541-7533-2022-21-2-48-64

33. Сотов А.В. Разработка методики проектирования технологических процессов изготовления жаровых труб ГТД методом селективного лазерного сплавления: дис. канд. техн. наук: 05.07.05. – Самара, 2017. – 219 с.

34. Allen, J., The business case for additive manufacture, in Laser materials processing in aerospace and precision manufacturing. 2005: Rolls Royce, Derby

35. Агаповичев А.В. Разработка методики проектирования технологических процессов изготовления заготовок моноколес ГТД из титановых сплавов

селективным лазерным сплавлением: дис. канд. техн. наук: 05.07.05. – Самара, 2020. – 212 с.

36. Расчетная методика определения технологических параметров прямого лазерного выращивания титановых сплавов / Г.А. Туричин, Е.А. Валдайцева, С.Ю. Иванов, О.Г. Климова-Корсмик // Морские интеллектуальные технологии. – 2017. – № 4-1(38). – С. 163-168.

37. ГОСТ Р 57558-2017/ISO/ASTM 52900:2015 Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 1. Термины и определения. Additive manufacturing processes. General principles. Part 1. Terminology. Дата введения 2017-12-01. Официальное издание. М.: Стандартиформ, 2018 г.

38. Прямое лазерное выращивание крупногабаритных металлических компонентов морской и авиационной техники / Г.А. Туричин, Е.В. Земляков, О.Г. Климова-Корсмик, К.Д. Бабкин // Высокоэнергетические и специальные материалы: демилитаризация, антитерроризм и гражданское применение: сборник тезисов XIV Международной конференции, Томск, 03–05 сентября 2018 года. – Томск: Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2018. – С. 135-138

39. Получение металломатричных композиционных материалов с применением аддитивной технологии прямого лазерного выращивания / В.В. Промахов, А.С. Жуков, М.Х. Зиятдинов [и др.] // Аддитивные технологии: настоящее и будущее: Материалы V международной конференции, Москва, 22 марта 2019 года. – Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, 2019. – С. 317-335.

40. Компания Fraunhofer . Интернет-сайт компании Fraunhofer [Электронный ресурс] URL: [www.ilt.fraunhofer.de](http://www.ilt.fraunhofer.de) (дата обращения 17.01.2025).

41. Guner, A., Bidare, P., Jiménez, A. et al. Nozzle Designs in Powder-Based Direct Laser Deposition: A Review. Int. J. Precis. Eng. Manuf. 23, 1077–1094 (2022). <https://doi.org/10.1007/s12541-022-00688-1>

42. Патент № 2709694 С1 Российская Федерация, МПК В22F 3/105, В33У 30/00, В33У 10/00. Способ изготовления высокоточной заготовки из порошка титанового

сплава : № 2018139581 : заявл. 08.11.2018 : опубл. 19.12.2019 / Г. А. Туричин, Е. В. Земляков, М. В. Кузнецов [и др.] ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет» (СПбГМТУ), Публичное акционерное общество «ОДК-Уфимское моторостроительное производственное объединение» (ПАО «ОДК-УМПО»).

43. Additive manufacturing of large parts / G. A. Turichin, O. G. Klimova-Korsmik, K. D. Babkin, S. Y. Ivanov // Additive manufacturing : Учебное пособие. – Москва : Общество с ограниченной ответственностью «Научно-издательский центр ИНФРА-М», 2019. – Р. 531-568. – DOI 10.1016/B978-0-12-818411-0.00001-X.

44. ГОСТ Р 59035—2020 «Аддитивные технологии. Металлопорошковые композиции. Общие требования» от 30.12.2020 № 1445-ст // Стандартинформ. – 2021 г. – Дата введения – 2021-03-01. – 8 с.

45. ГОСТ Р 57558-2017/ISO/ASTM 52900:2015 «Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Термины и определения» от 27.07.2017 № 752-ст // Стандартинформ. – 2020 г. – Дата введения – 01.12.2017 – 12 с.

46. Применение прямого лазерного сплавления металлических порошков из жаропрочных сплавов в двигателестроении / А.В. Балякин, Д.Л. Скуратов, А.И. Хаймович, М.А. Олейник // Вестник Московского авиационного института. – 2021. – Т. 28. – № 3. – С. 202-217. – DOI 10.34759/vst-2021-2-202-217.

47. Montero, J., Vitale, P., Weber, S., Bleckmann, M., Paetzold, K., 2020. Indirect Additive Manufacturing of resin components using polyvinyl alcohol sacrificial moulds. Procedia CIRP. 91, 388-395. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.191>

48. R. M. Mahamood, E.T.A. Effect of laser power on surface finish during laser metal deposition process. in World congress on Engineering and Computer science. 2014. San Francisco.

49. Flat top laser beam // Design and Manufacture of Diffractive Optical Elements for high power lasers URL: <https://www.holoor.co.il/flat-top-laser-beam/> (дата обращения: 19.01.2025).

50. Yushchenko, K.A. and V.S. Savchenko, Classification and Mechanisms of Cracking in Welding High-Alloy Steels and Nickel Alloys in Brittle Temperature Ranges, in Hot Cracking Phenomena in Welds II, T. Böllinghaus, et al., Editors. 2008, Springer Berlin Heidelberg. p. 95-114.

51. Santo, L. and Davim, J. (2014). Surface engineering techniques and applications: Research advancements. IGI Global. Page 154.

52. Schneider, M.F., Laser cladding with powder, effect of some machining parameters on clad properties. 1998: Universiteit Twente.

53. Rangaswamy P, Holden TM, Rogge RB, Griffith ML. Residual stresses in components formed by the laserengineered net shaping (LENS®) process. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design. 2003; 38 (6): 519-527. doi:10.1243/030932403770735881

54. Что такое сварочная деформация // Kobelco-welding URL: [https://www.kobelco-welding.jp/russian/education-center/abc/ABC\\_2006-03.html](https://www.kobelco-welding.jp/russian/education-center/abc/ABC_2006-03.html) (дата обращения: 19.01.2025).

55. Kamara, A. M., S. Marimuthu, and L. Li. «A numerical investigation into residual stress characteristics in laser deposited multiple layer waspaloy parts» Journal of Manufacturing Science and Engineering 133.3 (2011): 031013.

56. Lawrence, J. R., Waugh, D. 2014. “Laser surface engineering: processes and Applications”. Woodhead publishing series in electronic and optical materials. Elsevier science. SN: 9781782420798.

57. Labudovic, M., D. Hu, and R. Kovacevic. «A three dimensional model for direct laser metal powder deposition and rapid prototyping» Journal of materials science 38.1 (2003): 35-49.

58. Moat, R. J., et al. «Stress distributions in multilayer laser deposited Waspaloy parts measured using neutron diffraction» (2007).

59. Pratt, P., et al. «Residual stress measurement of laser-engineered net shaping AISI 410 thin plates using neutron diffraction» Metallurgical and Materials Transactions A 39.13 (2008): 3155-3163.

60. Современные проблемы моделирования теплопереноса в технологических процессах селективного лазерного спекания и сплавления / С.И. Жаворонок, А.С. Курбатов, Л.Н. Рабинский, Ю.О. Соляев // Теплофизика высоких температур. – 2019. – Т. 57. – № 6. – С. 919-952. – DOI 10.1134/S0040364419060176.

61. Численный анализ процесса электронно-лучевой аддитивной наплавки с вертикальной подачей проволочного материала / Г.Л. Пермяков, Р.П. Давлятшин, В.Я. Беленький [и др.] // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2022. – Т. 24. – № 3. – С. 6-21. – DOI 10.17212/1994-6309-2022-24.3-6-21.

62. Laser powder-bed fusion additive manufacturing: Physics of complex melt flow and formation mechanisms of pores, spatter and denudation zones / S.A. Khairallah, A.T. Anderson, A. Rubenchik, W.E. King // Acta Materialia. – 2016. – Vol. 108 (16). – P. 36-45. -. DOI: 10.1016/j.actamat.2016.02.014.

63. Wang S. H., Zhu L. D., Dun Y. C., Yang Z. C., Fuh J. Y. H., Yan W. T. Multi-physics modeling of direct energy deposition process of thin-walled structures: defect analysis // Comput. Mech. 2021. Vol. 67. P. 1229–1242.

64. DebRoy T., Wei H. L., Zuback J. S., Mukherjee T., Elmer J. W., Milewski J. O., Beese A. M., Wilson-Heid A., De A., Zhang W. Additive manufacturing of metallic components – process, structure and properties // Prog. Mater. Sci. 2018. Vol. 92. P. 112–224.

65. Zhu G. X., Li D. C., Zhang A. F., Pi G., Tang Y. P. The influence of laser and powder defocusing characteristics on the surface quality in laser direct metal deposition // Opt. Laser Technol. 2012. Vol. 44. P. 349–356.

66. Zhong C. L., Biermann T., Gasser A., Poprawe R. Experimental study of effects of main process parameters on porosity, track geometry, deposition rate, and powder efficiency for high deposition rate laser metal deposition // J. Laser Appl. 2015. Vol. 27.

67. Tan H., Shang W. X., Zhang F. Y., Clare A. T., Lin X., Chen J., Huang W. D. Process mechanisms based on powder flow spatial distribution in direct metal deposition // J. Mater. Process. Technol. 2018. Vol. 254. P. 361–372.



68. Haley J. C., Zheng B. L., Bertoli U. S., Dupuy A. D., Schoenung J. M., Lavernia E. J. Working distance passive stability in laser directed energy deposition additive manufacturing // *Mater. Des.* 2019. Vol. 161. P. 86–94.
69. Wang X. L., Liu Z. C., Guo Z. W., Hu Y. W. A fundamental investigation on three-dimensional laser material deposition of AISI316L stainless steel // *Opt. Laser Technol.* 2020. Vol. 126.
70. Chen B., Yao Y. Z., Huang Y. H., Wang W. K., Tan C. W., Feng J. C. Quality detection of laser additive manufacturing process based on coaxial vision monitoring // *Sens. Rev.* 2019. Vol. 39. P. 512–521.
71. Mazzarisi M., Errico V., Angelastro A., Campanelli S. L. Influence of standoff distance and laser defocusing distance on direct laser metal deposition of a nickel-based superalloy // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2022. Vol. 120. P. 2407–2428.
72. Alimardani M., Fallah V., Irvani-Tabrizipour M., Khajepour A. Surface finish in laser solid freeform fabrication of an AISI 303L stainless steel thin wall // *J. Mater. Process. Technol.* 2012. Vol. 212. P. 113–119.
73. Gharbi M., Peyre P., Gorny C., Carin M., Morville S., Le Masson P., Carron D., Fabbro R. Influence of various process conditions on surface finishes induced by the direct metal deposition laser technique on a Ti-6Al-4V alloy // *J. Mater. Process. Technol.* 2013. Vol. 213. P. 791–800.
74. Gharbi M., Peyre P., Gorny C., Carin M., Morville S., Le Masson P., Carron D., Fabbro R. Influence of a pulsed laser regime on surface finish induced by the direct metal deposition process on a Ti64 alloy // *J. Mater. Process. Technol.* 2014. Vol. 214. P. 485–495.
75. Yang N., Yee J., Zheng B., Gaiser K., Reynolds T., Clemon L., Lu W. Y., Schoenung J. M., Lavernia E. J. Process-structure-property relationships for 316L stainless steel fabricated by additive manufacturing and its implication for component engineering // *J. Therm. Spray. Technol.* 2017. Vol. 26. P. 610–626.
76. Sun J. Y., Zhao Y., Yang L., Zhao X. F., Qu W. R., Yu T. B. Effect of shielding gas flow rate on cladding quality of direct laser fabrication AISI 316L stainless steel // *J. Manuf. Process.* 2019. Vol. 48. P. 51–65.

77. Zhang J. C., Shi S. H., Fu G. Y., Shi J. J., Zhu G. X., Cheng D. J. 2019. Analysis on surface finish of thin-wall parts by laser metal deposition with annular beam // Opt. Laser Technol. 2019. Vol. 119.
78. Izadi M., Farzaneh A., Mohammed M., Gibson I., Rolfe B. A review of laser engineered net shaping (LENS) build and process parameters of metallic parts // Rapid Prototyp. J. 2020. Vol. 26. № 6. P. 1059–1078.
79. Wu C. C., Zafar M. Q., Zhao H., Wang Y., Scholer C., Heinigk C., Niessen M., Schulz W. Multi-physics modeling of side roughness generation mechanisms in powder bed fusion // Addit. Manuf. 2021. Vol. 47.
80. Tan H., Hu G., Zhang F. Y., Fan W., Hou W., Huang W. D. Formation mechanism of adhering powder and improvement of the surface quality during laser solid forming // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2016. Vol. 86. P. 1329–1338.
81. Zheng B., Haley J. C., Yang N., Yee J., Terrassa K. W., Zhou Y., Lavernia E. J., Schoenung J. M. On the evolution of microstructure and defect control in 316L SS components fabricated via directed energy deposition // Mat. Sci. Eng.: A. 2019. Vol. 764.
82. Lin P. Y., Shen F. C., Wu K. T., Hwang S. J., Lee H. H. Process optimization for directed energy deposition of SS316L components // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2020. Vol. 111. P. 1387–1400.
83. Sun Z., Guo W., Li L. Numerical modelling of heat transfer, mass transport and microstructure formation in a high deposition rate laser directed energy deposition process // Addit. Manuf. 2020. Vol. 33.
84. Metelkova J., Kinds Y., Kempen K., de Formanoir C., Witvrouw A., Van Hooreweder B. On the influence of laser defocusing in selective laser melting of 316L // Addit. Manuf. 2018. Vol. 23. P. 161–169.
85. Thivillon, L. Potential of direct metal deposition technology for manufacturing thick functionally graded coatings and parts for reactors components / L. Thivillon, Ph. Bertrand, B. Laget, I. Smurov // Journal of Nuclear Materials. – 2009. – Vol. 385, iss. 2. – P. 236–241.

86. Nembach, E. Precipitation hardening of superalloys by ordered  $\gamma'$ -particles / E. Nembach, G. Neite // Progress in Materials Science. – 1985. – Vol. 29. – iss. 3. – P. 177–319.
87. Шалин, Р.Е. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов [Текст] / Р.Е. Шалин, И.Л. Светлов, Е. Б. Качанов и др. – Москва: Машиностроение, 1997. – 336 с.
88. Fleischer, R. L. Substitutional solution hardening / R. L. Fleischer // Acta metallurgica. – 1963. – Vol. 11. – iss. 3. – P. 203–209.
89. Fleischer, R. L. Solution hardening / R. L. Fleisgher // Acta metallurgica. – 1961. – Vol. 9. – iss. 11. – P. 996–1000.
90. Reed R. C. The superalloys: fundamentals and applications. – Cambridge university press, 2008.
91. Goodfellow, A. J. Strengthening mechanisms in polycrystalline nickel-based superalloys / A. J. Goodfellow // Materials Science and Technology. – 2018. – Vol. 34. – iss. 15. – P. 1793–1808.
92. Whitmore, L. Transmission electron microscopy of single and double aged 718Plus superalloy / L. Whitmore, H. Leitner, E. Povoden-Karadeniz // Materials Science and Engineering: A. – 2012. – Vol. 534. – P. 413–423.
93. Каблов, Е.Н. Физико-химические и технологические особенности создания жаропрочных сплавов, содержащих рений / Е. Н. Каблов // Вестник Московского университета. Серия 2. Химия. – 2005. – Т. 46, № 3. – С. 155–167.
94. Петрушин, Н.В. Исследование влияния размерного несоответствия периодов решеток  $\gamma$ - и  $\gamma'$ -фаз на характеристики жаропрочности дисперсионно-твердеющих никелевых сплавов / Н. В. Петрушин, И. А. Игнатова, А. В. Логунов, А. И. Самойлов, И. М. Разумовский // Металлы. – 1981. – № 6. – С. 153–159.
95. Reed, R.C. The superalloys: fundamentals and applications / R. C. Reed. – Cambridge: Cambridge university press, 2008. – 363 p.
96. Nabarro, F.R. N. Rafting in superalloys / F. R. N. Nabarro // Metallurgical and Materials transactions A. – 1996. – Vol. 27. – iss. 3. – P. 513–530.
97. Radis, R. Evolution of Size and Morphology of gamma' precipitates in Udimet 720 Li during Continuous Cooling / R. Radis, M. Schaffer, M. Albu, G. Kothleitner //

Superalloys 2008. – The Minerals, Metals & Materials Society (TMS), 2008. – P. 829–836.

98. Gaofeng, T. Cooling  $\gamma'$  precipitation behavior and strengthening in powder metallurgy superalloy FGH4096 / T. Gaofeng, J. Chengchang, W. Yin, L. Guoquan, H. Benfu // *Rare Metals*. – 2008. – Vol. 27. – iss. 4. – P. 410–417.

99. Babu, S. S. Characterization of the microstructure evolution in a nickel base superalloy during continuous cooling conditions / S. S. Babu, M. K. Miller, J. M. Vitek, S. A. David // *Acta Materialia*. – 2001. – Vol. 49. – iss. 20. – P. 4149–4160.

100. Alekseev, A.V. Modeling of the formation process of the coherent intermetallides in nickel alloys during laser treatment / A.V. Alekseev, E.A. Valdaytseva, V.L. Aleksandrov // *Key Engineering Materials*. – 2019. – Vol. 822. – P. 438–444.

101. Ricks, R. A. The growth of  $\gamma'$  precipitates in nickel-base superalloys / R.A. Ricks, A. J. Porter, R. C. Eob // *Acta Metallurgica*. – 1983. – Vol. 31. – iss. 1. – P. 43–53.

102. Conley, J. G. Effect of lattice disregistry variation on the late stage phase transformation behavior of precipitates in Ni-Al-Mo alloys / J. G. Conley, M. E. Fine, J. R. Weertman // *Acta Metallurgica*. – 1989. – Vol. 37. – iss. 4. – P. 1251–1263.

103. Кишкин, С. Т. Литейные жаропрочные сплавы на никелевой основе [Текст] / С. Т. Кишкин, Г. Б. Строганов, А. В. Логунов. – Москва: Машиностроение, 1987. – 116 с.

104. Lippold, J. C. Welding metallurgy and weldability of nickel-base alloys [Text] / J. C. Lippold, S. D. Kiser, J. N. DuPont. – New York: John Wiley & Sons, 2011. – 431 p.

105. Kusabiraki, K. Lattice Constants of  $\gamma$  and  $\gamma''$  Phases and  $\gamma''/\gamma$  lattice Mismatches in a Ni-15Cr-8Fe-6Nb Alloy / K. Kusabiraki, I. Hayakawa, S. Ikeuchi, T. Ooka // *ISI International*. – 1996. – Vol. 36. – iss. 3. – P. 310–316.

106. Floreen, S. The metallurgy of alloy 625 / S. Floreen, G. E. Fuchs, W. J. Yang // *Superalloys*. – 1994. – Vol. 718. – iss. 625. – P. 13–37.

107. Smith, G. D. The role of niobium in wrought precipitation-hardened nickel-base alloys / G. D. Smith, S. J. Patel // *Superalloys*. – 2005. – Vol. 718. – P. 625–706.

108. Tian, Y. Rationalization of microstructure heterogeneity in INCONEL 718 builds made by the direct laser additive manufacturing process / Y. Tian, D. McAllister, H.

Colijn, M. Mills, D. Farson // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2014. – Vol. 45. – iss. 10. – P. 4470–4483.

109. Chaturvedi, M. C. Strengthening mechanisms in Inconel 718 super alloy / M. C. Chaturvedi, Y. Han // Metal science. – 1983. – Vol. 17. – iss. 3. – P. 145–149.

110. Li, R. B. Isolation and determination for  $\delta$ ,  $\gamma'$  and  $\gamma''$  phases in Inconel 718 alloy / R. B. Li, M. Yao, W. C. Liu, X. C. He // Scripta Materialia. – 2002. – Vol. 46. – iss. 9. – P. 635–638.

111. Suave, L. M. Microstructural evolutions during thermal aging of alloy 625: impact of temperature and forming process / L. M. Suave, J. Cormier, P. Villechaise, A. Soula // Metallurgical and materials transactions A. – 2014. – Vol. 45. – iss. 7. – P. 2963–2982.

112. Shankar, V. Microstructure and mechanical properties of Inconel 625 super alloy / V. Shankar, K. B. S. Rao, S. L. Mannan // Journal of nuclear materials. – 2001. – Vol. 288. – iss. 2–3. – P. 222–232.

113. Sundararaman, M. Precipitation of an intermetallic phase with Pt 2 Mo-type structure in alloy 625 / M. Sundararaman, L. Kumar, G. E. Prasad // Metallurgical and Materials Transactions A. – 1999. – Vol. 30. – iss. 1. – P. 41–52.

114. Kirman, I. The precipitation of Ni 3 Nb phases in a Ni-Fe-Cr-Nb alloy / I. Kirman, D. H. Warrington // Metallurgical Transactions. – 1970. – Vol. 1. – iss. 10. – P. 2667–2675.

115. Parimi, L. L. Microstructural and texture development in direct laser fabricated IN718 / L. L. Parimi, G. A. Ravi, D. Clark, M. M. Attallah // Materials Characterization. – 2014. – Vol. 89. – P. 102–111.

116. Sui, S. Microstructures and stress rupture properties of pulse laser repaired Inconel 718 superalloy after different heat treatments / S. Sui, J. Chen, L. Ma, W. Fan, H. Tan, F. Liu // Journal of Alloys and Compounds. – 2019. – Vol. 770. – P. 125–135.

117. Huang, Y. The evolution of delta-phase in a superplastic Inconel 718 alloy / Y. Huang, T. G. Langdon // Journal of materials science. – 2007. – Vol. 42. – iss. 2. – P. 421–427.

118. Dehmas, M. TEM study of high-temperature precipitation of delta phase in Inconel 718 alloy / M. Dehmas, J. Lacaze, A. Niang, B. Viguiere // *Advances in materials science and engineering*. – 2011. – Vol. 2011. – P. 1–9.
119. Lin, Y. C. Effects of Initial  $\delta$  Phase on Creep Behaviors and Fracture Characteristics of a Nickel-Based Superalloy / Y. C. Lin, L. X. Yin, S. C. Luo, D. G. He // *Advanced Engineering Materials*. – 2018. – Vol. 20. – iss. 4. – P. 1700820.
120. Sundararaman, M. Precipitation of the  $\delta$ -Ni 3 Nb phase in two Nickel base superalloys / M. Sundararaman, P. Mukhopadhyay, S. Banerjee // *Metallurgical transactions A*. – 1988. – Vol. 19. – iss. 3. – P. 453–465.
121. Gribbin, S. Role of grain structure, grain boundaries, crystallographic texture, precipitates, and porosity on fatigue behavior of Inconel 718 at room and elevated temperatures / S. Gribbin, S. Ghorbanpour, N. C. Ferreri, J. Bicknell // *Materials Characterization*. – 2019. – Vol. 149. – P. 184–197.
122. Chen, W. Dependence of creep fracture of Inconel 718 on grain boundary precipitates / W. Chen, M. C. Chaturvedi // *Acta Materialia*. – 1997. – Vol. 45. – Vol. 7. – P. 2735–2746.
123. ASM specialty handbook: Nickel, cobalt, and their alloys [Text]. / ed. J. R. Davis. – Ohio: ASM international, 2000. – 422 p.
124. Zhang, Y. Effect of heat treatment on niobium segregation of laser-cladded IN718 alloy coating / Y. Zhang, Z. Li, P. Nie, Y. Wu // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2013. – Vol. 44. – iss. 2. – P. 708–716.
125. Sui, S. The failure mechanism of 50% laser additive manufactured Inconel 718 and the deformation behavior of Laves phases during a tensile process / S. Sui, J. Chen, X. Ming, S. Zhang, X. Lin // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2017. – Vol. 91. – iss. 5. – P. 2733–2740.
126. DuPont, J. N. Solidification of Nb-bearing superalloys: Part I. Reaction sequences / J. N. DuPont, M. R. Notis, A. R. Marder, C. V. Robino // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 1998. – Vol. 29. – iss. 11. – P. 2785–2796.

127. Knorovsky, G. A. Inconel 718: a solidification diagram / G. A. Knorovsky, M.J. Cieslak, T. J. Headley // Metallurgical transactions A. – 1989. – Vol. 20. – iss. 10. – P. 2149–2158.
128. Stevens, E. L. Variation of hardness, microstructure, and Laves phase distribution in direct laser deposited alloy 718 cuboids / E. L. Stevens, J. Toman, A.C. To, M. Chmielus // Materials & design. – 2017. – Vol. 119. – P. 188–198.
129. Janaki Ram, G. D. Control of Laves phase in Inconel 718 GTA welds with current pulsing / G. D. Janaki Ram, A. Venugopal Reddy // Science and technology of welding and joining. – 2004. – Vol. 9. – iss. 5. – P. 390–398.
130. Antonsson, T. The effect of cooling rate on the solidification of Inconel 718 / T. Antonsson, H. Fredriksson // Metallurgical and Materials Transactions B. – 2005. – Vol. 36. – iss. 1. – P. 85–96.
131. Xie, H. Investigation on the Laves phase formation during laser cladding of IN718 alloy by CA-FE / H. Xie, K. Yang, F. Li, C. Sun, Z. Yu // Journal of Manufacturing Processes. – 2020. – Vol. 52. – P. 132–144.
132. Xiao, H. Laves phase control of Inconel 718 alloy using quasi-continuous-wave laser additive manufacturing / H. Xiao, S. Li, X. Han, J. Mazumder, L. Song // Materials & Design. – 2017. – Vol. 122. – P. 330–339.
133. Sui, S. The influence of Laves phases on the room temperature tensile properties of Inconel 718 fabricated by powder feeding laser additive manufacturing / S. Sui, H. Tan, J. Chen, C. Zhong, Z. Li, W. Fan, A. Gasser // Acta Materialia. – 2019. – Vol. 164. – P. 413–427.
134. Гуляев, А. П. Металловедение: учебник для вузов / А. П. Гуляев. – 6-е изд. перераб. и доп. – Москва: Металлургия, 1986. – 544 с.
135. Колачев, Б. А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов [Текст] / Б. А. Колачев, В. И. Елагин, В. А. Ливанов. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: МИСиС, 1999. – 416 с.
136. Jackman, L. The influence of reduced carbon on alloy 718 / L. Jackman, M. Boldy, A. Coffey // Superalloys. – 1991. – Vol. 718. – iss. 625. – P. 261–270.

137. Beattie, H. J. Intragranular precipitation of intermetallic compounds in complex Austenitic alloys / H. J. Beattie, W. C. Hagel // Transactions of The Metallurgical Society of AIME. – 1961. – Vol. 221. – iss. 1. – P. 28–35.
138. Kvapilova, M. Creep behaviour and life assessment of a cast nickel–base superalloy MAR–M247 / M. Kvapilova, J. Dvorak, P. Kral, K. Hrbacek // High Temperature Materials and Processes. – 2019. – Vol. 38. – iss. 2019. – P. 590–600.
139. Szczotok, A. Quantitative evaluation of carbides in nickel-base superalloy MAR–M247 / A. Szczotok // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2011. – Vol. 22. – iss. 1. – P. 012007.
140. Caron J.L., Sowards J.W. Weldability of nickel-base alloys. // In: Comprehensive materials processing. Elsevier Ltd, 2014. pp. 151-179.
141. Kou S. Welding Metallurgy. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2003.
142. Lippold J.C. Welding metallurgy and weldability. First edition ed. Hoboken: John Wiley & sons, 2015. 400 pp.
143. Dye, D., O. Hunziker, and R. Reed, Numerical analysis of the weldability of superalloys. Acta materialia, 2001. 49(4): p. 683-697.
144. Ashan, M. N. 2011. Modelling and analysis of Laser Direct Metal deposition of Ti-6Al-4V. PhD Thesis. University of Manchester.
145. Klimova-Korsmik, O.G. Structure and properties of TI-6AL-4V titanium alloy products obtained by direct laser deposition and subsequent heat treatment / O.G. Klimova-Korsmik, G.A. Turichin, S.A. Shalnova, M.O. Gushchina, V.V. Cheverikin // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1109. – P. 1-8
146. P.-H. Li Thermomechanical response of 3D laser-deposited Ti–6Al–4V alloy over a wide range of strain rates and temperatures / P.-H. Li, W.-G. Guo, W.-D. Huang, Y. Su, X. Lin, K.-B. Yuan // Materials Science and Engineering: A. – 2015. – Vol. 647. – P. 34–42.
147. Vildanov, A.M. Macro defects in direct laser deposition process / A.M. Vildanov, K.D. Babkin, E.V. Alekseeva // Materials Today: Proceedings – 2019. – Vol. 30. – P. 523-527.



148. Vilaro, T. As-Fabricated and Heat-Treated Microstructures of the Ti-6Al-4V Alloy Processed by Selective Laser Melting \ T. Vilaro, C. Colin J. D. Bartout \ Metallurgical and Materials Transactions A. – 2011. – Vol. 42. – Iss. 10. – P. 3190–3199
149. C. de Formanoir Electron beam melted Ti–6Al–4V: microstructure, texture and mechanical behavior of the as-built and heat-treated material / C. de Formanoir, S. Michotte, O. Rigo, L. Germain, S. Godet // Materials Science and Engineering: A – 2016. – Vol. 652. – P. 105–119.
150. Kasperovich, Galina Improvement of fatigue resistance and ductility of TiAl6V4 processed by selective laser melting/ Galina Kasperovich, Joachim Hausmann // Journal of Materials Processing Technology. – 2015. – Vol. 220. – P. 202-214.
151. Gaytan, S.M. Advanced metal powder based manufacturing of complex components by electron beam melting / S.M. Gaytan, L.E. Murr, F. Medina, E. Martinez, M.I. Lopez, R.B. Wicker // Materials Technology. – 2009. – Vol. 24. – P. 180–190.
152. Потапов С. Д., Перепелица Д. Д. Исследование влияния остаточных напряжений в зоне расположения трещины на скорость ее роста при циклическом нагружении // Вестник Московского авиационного института. – 2014. – Т. 21. – № 1. – С. 104-110.
153. Установка прямого лазерного выращивания. Руководство по эксплуатации. – 2022. – С. 219.
154. Рыкалин, Н.Н. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник / Н.Н. Рыкалин, А.А. Углов, И.В. Зуев, А.Н. Кокора. – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
155. Прохоров, А.М. Взаимодействие лазерного излучения с металлами / А.М. Прохоров, В.И. Конов, И. Урсу, И.Н. Михэилеску. – М.: Наука, 1984. – 312 с.
156. Черепанов, Г.П. О форме и глубине реза лазерным лучом / Г.П. Черепанов, А.Г. Черепанов // Физика и химия обработки материалов. – 1990. – № 2. – С. 133 – 137.
157. Schulz, W. On laser fusion cutting of metals / W. Schulz, G. Simon, H.M. Urbassek, I. Decker // J. Phys. D: Appl. Phys. – 1987. – V. 20. – P. 481 – 488.

158. Нестеров, А.В. Особенности резки металлов лазерным лучом с осесимметричной поляризацией / А.В. Нестеров, В.Г. Низьев // Изв. РАН. Сер. Физ. – 1999. – Т. 63. – №. 10. – С. 2039 – 2046.
159. C.-Y. Liu and J. Lin, “Thermal processes of a powder particle in coaxial laser cladding,” *Opt. Laser Technol.* 35, 81–86 (2003). [https://doi.org/10.1016/S0030-3992\(02\)00145-7](https://doi.org/10.1016/S0030-3992(02)00145-7)
160. T. L. Bergman, A. S. Lavine, F. P. Incorpera, and D. P. DeWitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 7th ed. (John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, 2011).
161. Лившиц, Б. Г. Физические свойства металлов и сплавов / Б. Г. Лившиц, В. С. Крапошин, Я. Л. Линецкий. – Москва : Металлургия, 1980. – 320 с.
162. Технология термообработки сварного ротора ГТД из жаропрочного сплава. Особенности технологического процесса / А.В. Мендохов, Е.В. Родин, А.В. Кошелев, А.И. Евдокимов // *Насосы. Турбины. Системы.* – 2020. – №4(37). – С. 63-68.
163. Римша, П. Б. Разработка системы автоматического нагрева и охлаждения при проведении термической обработки дисков газотурбинных двигателей / П.Б. Римша, А.О. Толоконский // *Вестник Национального исследовательского ядерного университета МИФИ.* – 2021. – Т. 10, № 5. – С. 448-458. <http://doi.org/10.1134/S2304487X21050084>.
164. Особенности формирования структурно-фазового состояния сплава ЭП648 при селективном лазерном сплавлении / О.Г. Оспенникова, С.А. Наприенко, П.Н. Медведев [и др.] // *Труды ВИАМ.* – 2021. – № 8(102). – С. 3-11. <http://doi.org/10.18577/2307-6046-2021-0-8-3-11>
165. Исследование свойств сплава ЭП648, полученного методом селективного лазерного сплавления металлических порошков / А. Г. Евгенов, А. М. Рогалев, С. В. Неруш, И. С. Мазалов // *Труды ВИАМ.* – 2015. – № 2. – С. 2.
166. Прагер, С. М. Исследование механических свойств и структуры образцов, полученных методом селективного лазерного сплавления (СЛС) из сплава ВЖ159 / С. М. Прагер, Т. В. Солодова, О. Ю. Татаренко // *Труды ВИАМ.* – 2017. – № 11(59). – С. 1. <http://doi.org/10.18577/2307-6046-2017-0-11-1-1>.

167. Балякин, А. В. Влияние термической обработки на структуру и свойства заготовок из жаропрочных никелевых сплавов, полученных по аддитивным технологиям / А. В. Балякин, Е. А. Носова, М. А. Олейник // Вестник Московского авиационного института. – 2023. – Т. 30, № 3. – С. 209-219.

168. Теория термической обработки: учебник для вузов .4-е изд., перераб. и доп.: Новиков И.И.: Металлургия, 1986. 480 с.

169. Толораия, В.Н. Влияние режимов направленной кристаллизации и термообработки на пористость в монокристаллах никелевых жаропрочных сплавов / В. Н. Толораия, И. Л. Светлов, А. Г. Зуев // Металлы. – 1991. – № 5. – С. 70-76.

170. Овсепян С.В., Ломберг Б.С., Бакрадзе М.М., Летников М.Н. Термическая обработка деформируемых жаропрочных никелевых сплавов для дисков ГТД // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2011. – С. 122-130.

171. Sachs G. The determination of residual stresses in rods and tubes // Z. Metallkunde. 1927. Т. 19, №. 9. С. 352-357.

172. Давиденков Н.Н. Об измерении остаточных напряжений // Заводская лаборатория. – 1950. – Т. 16, № 2. – С. 188.

173. В.Ф. Скворцов, А.Ю. Арляпов, А.О. Бознак, И.И. Оголь Применение метода Н.Н. Давиденкова для оценки окружных остаточных напряжений в обработанных дорнованием полых цилиндрах, Системы. Методы. Технологии. – 2016, №4 (32). – С. 65-70.

174. Прутки прессованные из сплавов ВХ4, ВХ4Ш, ВХ4А. Технические условия ТУ 1-809-358-79. – М.: ВИС, 1979. – 5 с.

175. Пономарев, Ю.Н. Исследование некоторых параметров и разработка технологии индукционной и вакуумной дуговой выплавки высоколегированных хромовых сплавов ВХ4 и ВХ4А. Дис.канд.техн. наук 05.323/ Ю.Н. Пономарев. ВИС. – М.,1970. – 33 с.

176. Прутки прессованные из сплава ВХ4 (Х65НВФТ). Технические условия // ТУ1850-540-56897835-2012. – Королев М.О.: ОАО «Композит», 2012. – 5с.

177. Патент №2105080 С1 Российская Федерация, МПК С22F 1/10. Способ термообработки жаропрочных дисперсионно-твердеющих сплавов на никель-хромовой основе перед пайкой : № 95106530/02 : заявл. 21.04.1995 : опубл. 20.02.1998 / В.Н. Семенов.

178. Патент № 2256723 С1 Российская Федерация, МПК С22F 1/10. Способ термической обработки изделий из жаропрочных, деформируемых, дисперсионно-твердеющих сплавов на никелевой основе: № 2004115649/02 : заявл. 24.05.2004: опубл. 20.07.2005 / В.Б. Латышев, Е.Н. Каблов, Н.А. Анисимова, И.И. Овченкова; заявитель Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» (ФГУП «ВИАМ»).

179. Tan H., Shang W. X., Zhang F. Y., Clare A. T., Lin X., Chen J., Huang W. D. Process mechanisms based on powder flow spatial distribution in direct metal deposition // J. Mater. Process. Technol. 2018. Vol. 254. P. 361–372.

180. Haley J. C., Schoenung J. M., Lavernia E. J. Observations of particle-melt pool impact events in directed energy deposition // Addit. Manuf. 2018. Vol. 22. P. 368–374.

181. Р 50-54-93-88. Классификация, разработка и применение технологических процессов. – Введ. 1988-07-04. – М.: ВНИИНМАШ: Ротапринт ВНИИНМАШ, 1989. – 35 с.

182. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2024620533 Российская Федерация. Геометрические размеры и микроструктура образцов из сплава ЭП648, полученных прямым лазерным выращиванием : № 2023623915 : заявл. 14.11.2023 : опубл. 02.02.2024 / А.В. Балякин, М. О. Кудряшова, М.А. Олейник, А.А. Малютин; заявитель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева».

183. Расчет компенсации коробления от действия остаточных напряжений в аддитивном производстве / А. И. Хаймович, А. В. Балякин, М. А. Олейник [и др.]

// Вестник Московского авиационного института. – 2024. – Т. 31, № 1. – С. 215.

ПРИЛОЖЕНИЕ А Технологический процесс изготовления крупногабаритных заготовок деталей «кожух наружный камеры сгорания» и «кожух внутренний камеры сгорания» ГТД

Литера

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель темы Смелов В.

07.12.2022

КОМПЛЕКТ ДОКУМЕНТОВ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССАИзготовление заготовки ДСЕ "Кожух наружный камеры сгорания" методом П/В  
(наименование технологического процесса)Кожух наружный камеры сгорания  
(наименование узла, детали)ИЦ-206.01200.00501  
(обозначение)

(код детали, узла)

(изделие, заказ)

№ ПП (К, цеха) 80      Кол. листов                     \* - Главный технолог  
(Главный металлург)  
(Главный сварщик)

Разработал

Отв. исполнитель

Нормоконтроль

(Подпись)

Балякин А.В.

(фамилия И.О.)

07.12.22

(Дата)

(Подпись)

Хаймович А.И.

(фамилия И.О.)

07.12.22

(Дата)

(Подпись)

Виноградов А.С.

(фамилия И.О.)

07.12.22

(Дата)

Инвентарный №

ИЧО-33

19.12.2022



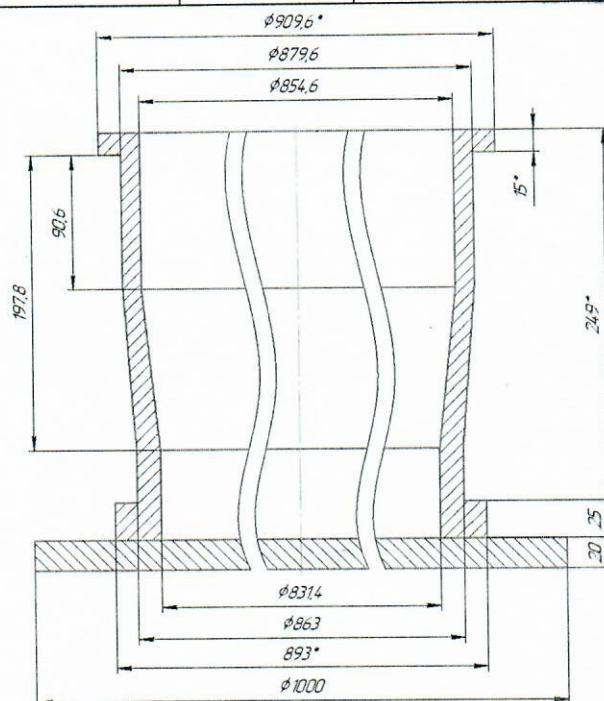
| МАРШРУТНАЯ<br>КАРТА |                   |                    | № цеха                     | Обозначение детали/узла<br>22РГ.330.001 | Наименование детали/узла<br>Кожух наружный камеры сгорания |        |     |
|---------------------|-------------------|--------------------|----------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------------------------|--------|-----|
| №<br>К/цеха         | №<br>участ-<br>ка | №<br>опера-<br>ции | НАИМЕНОВАНИЕ ОПЕРАЦИИ      | Кол.<br>листов                          | Оборудование                                               |        |     |
|                     |                   |                    |                            |                                         | Наименование                                               | Модель | Код |
| 80                  |                   | 005                | Подготовительная           |                                         |                                                            |        |     |
| 80                  |                   | 010                | Комплектование             |                                         |                                                            |        |     |
| 80                  |                   | 015                | Выращивание                |                                         | УПЛВ ИЛИСТ                                                 |        |     |
|                     |                   |                    |                            |                                         | Комплект                                                   |        |     |
|                     |                   |                    |                            |                                         | защитных                                                   |        |     |
|                     |                   |                    |                            |                                         | ограждений и                                               |        |     |
|                     |                   |                    |                            |                                         | фильтровенти                                               |        |     |
|                     |                   |                    |                            |                                         | ляционное                                                  |        |     |
|                     |                   |                    |                            |                                         | оборудование                                               |        |     |
|                     |                   |                    |                            |                                         | Винтовая                                                   |        |     |
|                     |                   |                    |                            |                                         | компрессорна                                               |        |     |
|                     |                   |                    |                            |                                         | я станция                                                  |        |     |
|                     |                   |                    |                            |                                         | FINI                                                       |        |     |
| 80                  |                   | 020                | Уборка излишков<br>порошка |                                         | Трехфазный                                                 |        |     |
|                     |                   |                    |                            |                                         | промышленны                                                |        |     |
|                     |                   |                    |                            |                                         | й ADS 340H                                                 |        |     |
| 80                  |                   | 025                | Контроль                   |                                         |                                                            |        |     |
| 80                  |                   | 030                | Маркирование               |                                         |                                                            |        |     |
| 80                  |                   | 035                | Транспортная               |                                         |                                                            |        |     |

Инвентарный №

|               |               |         |          |               |                 |         |          |
|---------------|---------------|---------|----------|---------------|-----------------|---------|----------|
| Изм. № докум. | Фамилия       | Подпись | Дата     | Изм. № докум. | Фамилия         | Подпись | Дата     |
| Технолог      | Балякин А.В.  |         | 03.12.22 |               |                 |         |          |
| Проверил      | Хаймович А.В. |         | 03.12.22 | Нач. БТК      |                 |         |          |
| Нач. ТБЦ      |               |         |          | Н.контроль    | Виноградов А.С. |         | 03.12.22 |
| Нач. цеха     |               |         |          | Гл.технолог   | Смелов В.Г.     |         | 04.12.22 |

|        |   |
|--------|---|
| Лист   | 1 |
| Листов | 1 |

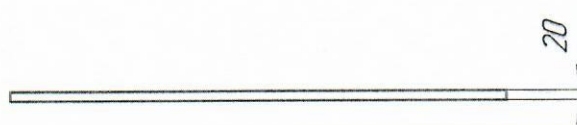
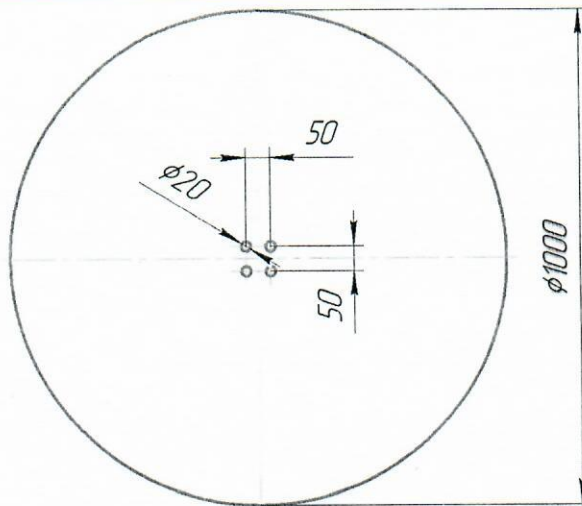




1. \*Размеры для справок.  
2. Допустимое отклонение от 3D-модели IT17/2

[illegible][illegible]

|                       |                |                           |                |                       |            |        |
|-----------------------|----------------|---------------------------|----------------|-----------------------|------------|--------|
| ОПЕРАЦИОННАЯ<br>КАРТА | № ПП (К, цеха) | Обозначение детали (узла) | № опер.        | Наименование операции |            |        |
|                       | 80             | 22РГ.330.001              | 010            | Комплектование        |            |        |
| Марка материала       | Твердость      | Оборудование              | Охлаждение     | Разряд                | Норма обл. | Т маш. |
| Сплав ХН50ВМТЮБ       |                |                           |                |                       |            |        |
| Инструкция по ОТ(ТБ)  |                | Тара                      | Приспособление |                       |            |        |
|                       |                |                           |                |                       |            |        |



| № пер. | Содержание перехода             | Инструмент              |                 | Режим обработки |   |   |
|--------|---------------------------------|-------------------------|-----------------|-----------------|---|---|
|        |                                 | режущий/вспомогательный | измерительный   | i               | S | n |
| 1      | Получить порошок для            |                         | Весы В/Р-10     |                 |   |   |
|        | выращивания со склада в размере |                         | ТУ              |                 |   |   |
|        | 150 кг ±10% по массе.           |                         | 25.06.416-75    |                 |   |   |
| 2      | Получить подложку для           |                         | Штангенцирку    |                 |   |   |
|        | выращивания заготовки согласно  |                         | ль              |                 |   |   |
|        | эскизу.                         |                         | ШЦ-III-630-0,1- |                 |   |   |
|        |                                 |                         | 1 ГОСТ 166-89   |                 |   |   |
|        |                                 |                         | Штангенцирку    |                 |   |   |
|        |                                 |                         | ль              |                 |   |   |
|        |                                 |                         | ШЦ-I-125-0,1-1  |                 |   |   |
|        |                                 |                         | ГОСТ 166-89     |                 |   |   |

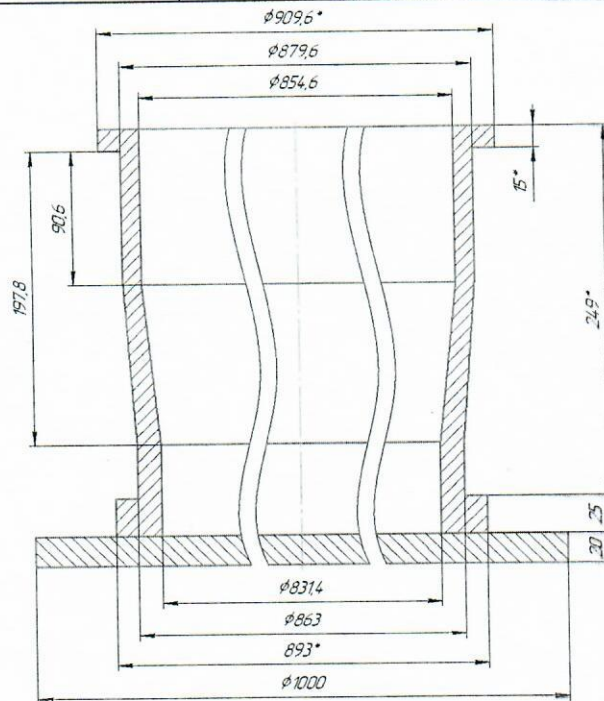
|               |               |               |                    |          |                   |                 |                    |          |        |
|---------------|---------------|---------------|--------------------|----------|-------------------|-----------------|--------------------|----------|--------|
| Инвентарный № | Изм. № докум. | Фамилия       | Подпись            | Дата     | Изм. № докум.     | Фамилия         | Подпись            | Дата     | Лист   |
|               | Разраб.       | Балякин А.В.  | <i>[Signature]</i> | 07.12.22 |                   |                 |                    |          | 1      |
|               | Проверил      | Хаймович А.В. | <i>[Signature]</i> | 07.12.22 | Нач.ОТК(БТК) № 80 |                 |                    |          | Листов |
|               | Нач. ТБ № 80  |               |                    |          | Н.контроль        | Виноградов А.С. | <i>[Signature]</i> | 07.12.22 | 2      |
|               | Нач. ПП № 80  |               |                    |          | Гл.технолог       | Смелов В.Г.     | <i>[Signature]</i> | 07.12.22 |        |







|                       |                |                           |                |                       |             |        |
|-----------------------|----------------|---------------------------|----------------|-----------------------|-------------|--------|
| ОПЕРАЦИОННАЯ<br>КАРТА | № ПП (К, цеха) | Обозначение детали (узла) | № опер.        | Наименование операции |             |        |
|                       | 80             | 22РГ.330.001              | 015            | Выращивание           |             |        |
| Марка материала       | Твердость      | Оборудование              | Охлаждение     | Разряд                | Норма обсл. | Т маш. |
| Сплав ХН50ВМТЮБ       |                |                           |                |                       |             |        |
| Инструкция по ОТ(ТБ)  |                | Тара                      | Приспособление |                       |             |        |
|                       |                |                           |                |                       |             |        |



1. \*Размеры для справок.  
2. Допустимое отклонение от 3D-модели IT17/2.

| № пер.        | Содержание перехода                                 | Инструмент              |                                   | Режим обработки |                   |                 |
|---------------|-----------------------------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|-----------------|-------------------|-----------------|
|               |                                                     | режущий/вспомогательный | измерительный                     | i               | S                 | n               |
| 1             | Включить установку УПЛВ.                            |                         |                                   |                 |                   |                 |
| 2             | Подготовить бункер для порошка.                     |                         |                                   |                 |                   |                 |
| 3             | Почистить колбы питателя и<br>подготовить порошок.  |                         |                                   |                 |                   |                 |
| 4             | Засыпать порошок в колбы.                           |                         | Весы В/Р-10<br>ТУ<br>25.06.416-75 |                 |                   |                 |
| 5             | Подготовить подложку и<br>установить на позиционер. |                         |                                   |                 |                   |                 |
| Инвентарный № | Изм. № докум.                                       | Фамилия                 | Подпись                           | Дата            | Изм. № докум.     | Фамилия         |
|               | Разраб.                                             | Балякин А.В.            |                                   | 07.12.22        |                   |                 |
|               | Проверил                                            | Хаймович А.В.           |                                   | 07.12.22        | Нач.ОТК(БТК) № 80 |                 |
|               | Нач. ТБ № 80                                        |                         |                                   |                 | Н.контроль        | Виноградов А.С. |
|               | Нач. ПП № 80                                        |                         |                                   |                 | Гл.технолог       | Смелов В.Г.     |
|               |                                                     |                         |                                   |                 |                   | Дата            |
|               |                                                     |                         |                                   |                 |                   | Лист            |
|               |                                                     |                         |                                   |                 |                   | 1               |
|               |                                                     |                         |                                   |                 |                   | Листов          |
|               |                                                     |                         |                                   |                 |                   | 2               |





|                       |                |                           |                |                         |             |        |
|-----------------------|----------------|---------------------------|----------------|-------------------------|-------------|--------|
| ОПЕРАЦИОННАЯ<br>КАРТА | № ПП (К, цеха) | Обозначение детали (узла) | № опер.        | Наименование операции   |             |        |
|                       | 80             | 22РГ.330.001              | 020            | Уборка излишков порошка |             |        |
| Марка материала       | Твердость      | Оборудование              | Охлаждение     | Разряд                  | Норма обсл. | Т маш. |
| Сплав ХН50ВМТЮБ       |                |                           |                |                         |             |        |
| Инструкция по ОТ(ТБ)  |                | Тара                      | Приспособление |                         |             |        |
|                       |                |                           |                |                         |             |        |

| № пер. | Содержание перехода                                         | Инструмент              |               | Режим обработки |   |   |
|--------|-------------------------------------------------------------|-------------------------|---------------|-----------------|---|---|
|        |                                                             | режущий/вспомогательный | измерительный | i               | S | n |
| 1      | Убедиться в окончании построения.                           |                         |               |                 |   |   |
| 2      | Откачать аргон из камеры.                                   |                         |               |                 |   |   |
| 3      | Извлечь заготовку и образцы-свидетели из камеры построения. |                         |               |                 |   |   |
| 4      | Очистить камеру построения от порошка и нагара.             |                         |               |                 |   |   |

|               |               |               |         |          |                    |                 |         |          |        |
|---------------|---------------|---------------|---------|----------|--------------------|-----------------|---------|----------|--------|
| Инвентарный № | Изм. № докум. | Фамилия       | Подпись | Дата     | Изм. № докум.      | Фамилия         | Подпись | Дата     | Лист   |
|               | Разраб.       | Балякин А.В.  |         | 07.12.22 |                    |                 |         |          | 1      |
|               | Проверил      | Хаймович А.В. |         | 07.12.22 | Нач. ОТК(БТК) № 80 |                 |         |          | Листов |
|               | Нач. ТБ № 80  |               |         |          | Н.контроль         | Виноградов А.С. |         | 07.12.22 | 1      |
|               | Нач. ПП № 80  |               |         |          | Гл.технолог        | Смелов В.Г.     |         | 07.12.22 |        |





[illegible]

|              |          |               |                                                                                     |          |                     |          |                 |                                                                                       |          |        |
|--------------|----------|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------|---------------------|----------|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------|----------|--------|
| Изм.         | № докум. | Фамилия       | Подпись                                                                             | Дата     | Изм.                | № докум. | Фамилия         | Подпись                                                                               | Дата     | Лист   |
| Разраб.      |          | Балякин А.В.  |  | 07.12.22 |                     |          |                 |                                                                                       |          | 1      |
| Проверил     |          | Хаймович А.В. |  | 07.12.22 | Нач. ОТК (БТК) № 80 |          |                 |                                                                                       |          | Листов |
| Нач. ТБ № 80 |          |               |                                                                                     |          | Н. контроль         |          | Виноградов А.С. |  | 07.12.22 |        |
| Нач. ОП № 80 |          |               |                                                                                     |          | Гл. технолог        |          | Смелов В.Г.     |  | 07.12.22 | 1      |





Литера

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель темы Смелов В.Г.

*Смелов В.Г.*  
07.12.22

## КОМПЛЕКТ ДОКУМЕНТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Изготовление заготовки ДСЕ "Кожух внутренний камеры сгорания" методом П/В  
(наименование технологического процесса)

Кожух внутренний камеры сгорания  
(наименование узла, детали)

ИЦ-206.01200.00601  
(обозначение)

(код детали, узла)

(изделие, заказ)

№ ПП (К, цеха) 80      Кол.ч.листов           

\* - Главный технолог  
(Главный металлург)  
(Главный сварщик)

Разработал

Отв. исполнитель

Нормоконтроль

*Б.А.*  
(Подпись)  
*Х.А.*  
(Подпись)  
*В.В.*  
(Подпись)

Балякин А.В.  
(фамилия И.О.)

Хаймович А.И.  
(фамилия И.О.)

Виноградов А.С.  
(фамилия И.О.)

07.12.22  
(Дата)

07.12.22  
(Дата)

07.12.22  
(Дата)

Инвентарный №

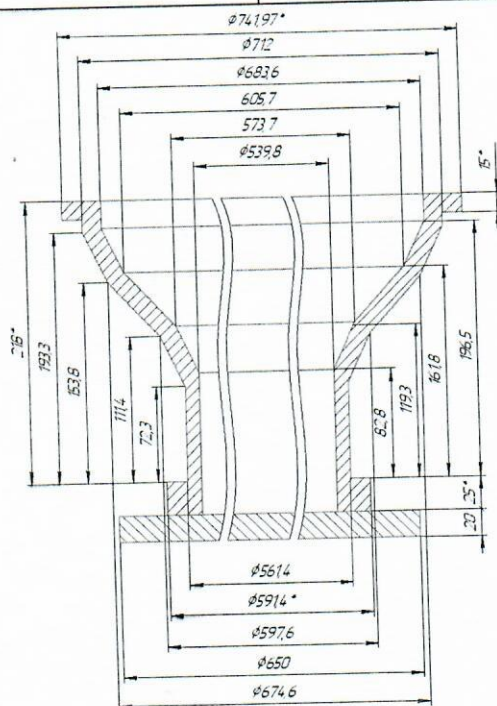
1490034

19.12.2022



| МАРШРУТНАЯ<br>КАРТА |                   |                    | № цеха                | Обозначение детали/узла<br>22РГ.330.002 | Наименование детали/узла<br>Кожух внутренний камеры сгорания |        |     |
|---------------------|-------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------|-----|
| №<br>К/цеха         | №<br>участ-<br>ка | №<br>опера-<br>ции | НАИМЕНОВАНИЕ ОПЕРАЦИИ | Кол.<br>листов                          | Оборудование                                                 |        |     |
|                     |                   |                    |                       |                                         | Наименование                                                 | Модель | Код |
| 80                  |                   | 005                | Подготовительная      |                                         |                                                              |        |     |
|                     |                   |                    |                       |                                         |                                                              |        |     |
| 80                  |                   | 010                | Комплектование        |                                         |                                                              |        |     |
|                     |                   |                    |                       |                                         |                                                              |        |     |
| 80                  |                   | 015                | Выращивание           |                                         | УПЛВ ИЛИСТ                                                   |        |     |
|                     |                   |                    |                       |                                         | Комплект                                                     |        |     |
|                     |                   |                    |                       |                                         | защитных                                                     |        |     |
|                     |                   |                    |                       |                                         | ограждений и                                                 |        |     |
|                     |                   |                    |                       |                                         | фильтровент                                                  |        |     |
|                     |                   |                    |                       |                                         | илиационное                                                  |        |     |
|                     |                   |                    |                       |                                         | оборудование                                                 |        |     |
|                     |                   |                    |                       |                                         | Винтовая                                                     |        |     |
|                     |                   |                    |                       |                                         | компрессорна                                                 |        |     |
|                     |                   |                    |                       |                                         | я станция                                                    |        |     |
|                     |                   |                    |                       |                                         | FINI                                                         |        |     |
|                     |                   |                    |                       |                                         |                                                              |        |     |
| 80                  |                   | 020                | Уборка излишков<br>   |                                         |                                                              |        |     |

|               |           |          |               |         |          |             |                 |         |          |      |        |
|---------------|-----------|----------|---------------|---------|----------|-------------|-----------------|---------|----------|------|--------|
| Инвентарный № |           |          |               |         |          |             |                 |         |          |      |        |
|               | Изм.      | № докум. | Фамилия       | Подпись | Дата     | Изм.        | № докум.        | Фамилия | Подпись  | Дата |        |
|               | Технолог  |          | Балякин А.В.  |         | 07.12.22 |             |                 |         |          |      | Лист   |
|               | Проверил  |          | Хаймович А.И. |         | 07.12.22 | Нач.БТК     |                 |         |          |      | 1      |
|               | Нач. ТБЦ  |          |               |         |          | Н.контроль  | Виноградов А.С. |         | 07.12.22 |      | Листов |
|               | Нач. цеха |          |               |         |          | Гл.технолог | Смелов В.Г.     |         | 07.12.22 |      | 1      |



1. \*Размеры для справок  
2. Допустимое отклонение от 3D-модели IT17/2

[illegible]

|               |               |                                                                                     |          |                   |                 |                                                                                       |          |        |
|---------------|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------|-------------------|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------|----------|--------|
| Изм. № док-м. | Фамилия       | Подпись                                                                             | Дата     | Изм. № док-м.     | Фамилия         | Подпись                                                                               | Дата     | Лист   |
| Разраб.       | Балякин А.В.  |  | 07.12.22 |                   |                 |                                                                                       |          | 1      |
| Проверил      | Хаймович А.И. |  | 07.12.22 | Нач.ОТК(БТК) № 80 |                 |                                                                                       |          | Листов |
| Нач. ТБ № 80  |               |                                                                                     |          | Н.контроль        | Виноградов А.С. |  | 07.12.22 |        |
| Нач. ПП № 80  |               |                                                                                     |          | Гл.технолог       | Смелов В.Г.     |  | 07.12.22 | 1      |

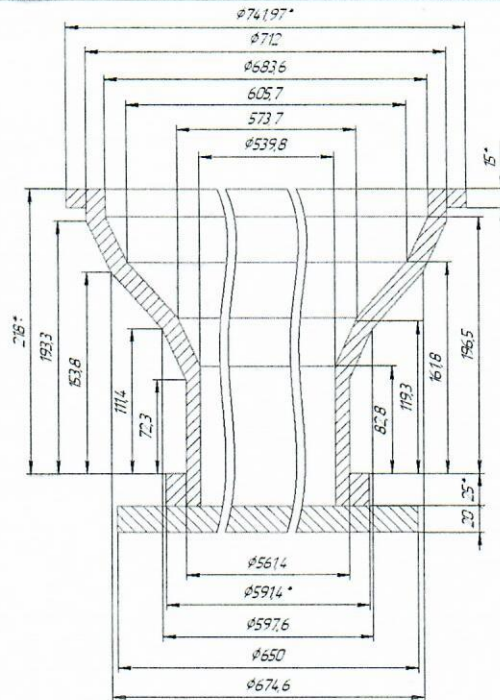








|                       |                |                           |                |                       |             |        |
|-----------------------|----------------|---------------------------|----------------|-----------------------|-------------|--------|
| ОПЕРАЦИОННАЯ<br>КАРТА | № ПП (К, цеха) | Обозначение детали (узла) | № опер.        | Наименование операции |             |        |
|                       | 80.            | 22РГ.330.002              | 015            | Выращивание           |             |        |
| Марка материала       | Твердость      | Оборудование              | Охлаждение     | Разряд                | Норма обсл. | Т маш. |
| Сплав ХН50ВМТЮБ       |                |                           |                |                       |             |        |
| Инструкция по ОТ(ТБ)  |                | Тара                      | Приспособление |                       |             |        |
|                       |                |                           |                |                       |             |        |



1 \*Размеры для справок.  
2 Допустимое отклонение от 3D-модели 1Т17/2

| № пер. | Содержание перехода                                 | Инструмент              |                                   | Режим обработки |   |   |
|--------|-----------------------------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|-----------------|---|---|
|        |                                                     | режущий/вспомогательный | измерительный                     | i               | S | n |
| 1      | Включить установку УП/В.                            |                         |                                   |                 |   |   |
| 2      | Подготовить бункер для порошка.                     |                         |                                   |                 |   |   |
| 3      | Почистить колбы питателя и<br>подготовить порошок.  |                         |                                   |                 |   |   |
| 4      | Засыпать порошок в колбы.                           |                         | Весы В/Р-10<br>ТУ<br>25.06.416-75 |                 |   |   |
| 5      | Подготовить подложку и<br>установить на позиционер. |                         |                                   |                 |   |   |

|               |              |          |               |         |          |                   |          |                 |         |          |        |
|---------------|--------------|----------|---------------|---------|----------|-------------------|----------|-----------------|---------|----------|--------|
| Инвентарный № | Изм.         | № докум. | Фамилия       | Подпись | Дата     | Изм.              | № докум. | Фамилия         | Подпись | Дата     | Лист   |
|               | Разраб.      |          | Балякин А.В.  |         | 07.12.22 |                   |          |                 |         |          | 1      |
|               | Проверил     |          | Хаймович А.И. |         | 07.12.22 | Нач.ОТК(БТК) № 80 |          |                 |         |          | Листов |
|               | Нач. ТБ № 80 |          |               |         |          | Н.контроль        |          | Виноградов А.С. |         | 07.12.22 |        |
|               | Нач. ПП № 80 |          |               |         |          | Гл.технолог       |          | Смелов В.Г.     |         | 07.12.22 | 2      |



[illegible]

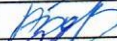
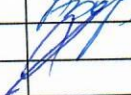
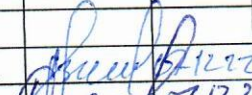
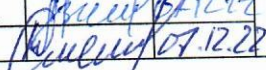


|                       |                |                           |                |                         |             |        |
|-----------------------|----------------|---------------------------|----------------|-------------------------|-------------|--------|
| ОПЕРАЦИОННАЯ<br>КАРТА | № ПП (К, цеха) | Обозначение детали (узла) | № опер.        | Наименование операции   |             |        |
|                       | 80             | 22РГ.330.002              | 020            | Уборка излишков порошка |             |        |
| Марка материала       | Твердость      | Оборудование              | Охлаждение     | Разряд                  | Норма обсл. | Т маш. |
| Сплав ХН50ВМТЮБ       |                |                           |                |                         |             |        |
| Инструкция по ОТ(ТБ)  |                | Тара                      | Приспособление |                         |             |        |
|                       |                |                           |                |                         |             |        |

| №<br>пер. | Содержание перехода                                         | Инструмент              |               | Режим обработки |   |   |
|-----------|-------------------------------------------------------------|-------------------------|---------------|-----------------|---|---|
|           |                                                             | режущий/вспомогательный | измерительный | i               | S | n |
| 1         | Убедиться в окончании построения.                           |                         |               |                 |   |   |
| 2         | Откачать аргон из камеры.                                   |                         |               |                 |   |   |
| 3         | Извлечь заготовку и образцы-свидетели из камеры построения. |                         |               |                 |   |   |
| 4         | Очистить камеру построения от порошка и нагара.             |                         |               |                 |   |   |

|               |               |               |         |          |                    |                 |         |          |        |
|---------------|---------------|---------------|---------|----------|--------------------|-----------------|---------|----------|--------|
| Инвентарный № | Изм. № докум. | Фамилия       | Подпись | Дата     | Изм. № докум.      | Фамилия         | Подпись | Дата     | Лист   |
|               | Разраб.       | Балякин А.В.  |         | 07.12.22 |                    |                 |         |          | 1      |
|               | Проверил      | Хаймович А.И. |         | 07.12.22 | Нач. ОТК(БТК) № 80 |                 |         |          | Листов |
|               | Нач. ТБ № 80  |               |         |          | Н.контроль         | Виноградов А.С. |         | 07.12.22 | 1      |
|               | Нач. ПП № 80  |               |         |          | Гл.технолог        | Смелов В.Г.     |         | 07.12.22 |        |

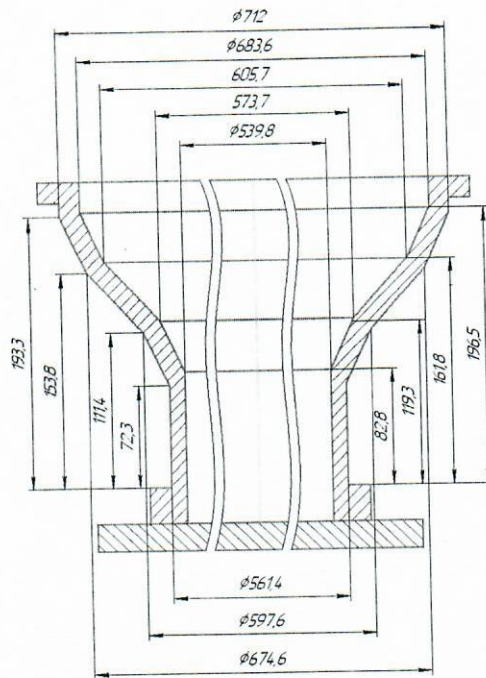
[illegible]

|               |               |               |                                                                                     |          |                   |                 |                                                                                       |          |        |  |  |
|---------------|---------------|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------|-------------------|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------|----------|--------|--|--|
| Инвентарный № |               |               |                                                                                     |          |                   |                 |                                                                                       |          |        |  |  |
|               |               |               |                                                                                     |          |                   |                 |                                                                                       |          |        |  |  |
|               |               |               |                                                                                     |          |                   |                 |                                                                                       |          |        |  |  |
|               |               |               |                                                                                     |          |                   |                 |                                                                                       |          |        |  |  |
|               |               |               |                                                                                     |          |                   |                 |                                                                                       |          |        |  |  |
|               |               |               |                                                                                     |          |                   |                 |                                                                                       |          |        |  |  |
|               |               |               |                                                                                     |          |                   |                 |                                                                                       |          |        |  |  |
|               |               |               |                                                                                     |          |                   |                 |                                                                                       |          |        |  |  |
|               |               |               |                                                                                     |          |                   |                 |                                                                                       |          |        |  |  |
|               |               |               |                                                                                     |          |                   |                 |                                                                                       |          |        |  |  |
|               | Изм. № докум. | Фамилия       | Подпись                                                                             | Дата     | Изм. № докум.     | Фамилия         | Подпись                                                                               | Дата     | Лист   |  |  |
|               | Разраб.       | Балякин А.В.  |  | 02.12.22 |                   |                 |                                                                                       |          | 1      |  |  |
|               | Проверил      | Хаймович А.И. |  | 07.12.22 | Нач.ОТК(БТК) № 80 |                 |                                                                                       |          | Листов |  |  |
|               | Нач. ТБ № 80  |               |                                                                                     |          | Н.контроль        | Виноградов А.С. |  | 07.12.22 | 1      |  |  |
|               | Нач. ПП № 80  |               |                                                                                     |          | Гл.технолог       | Смелов В.Г.     |  | 07.12.22 |        |  |  |





|                                                |               |                    |         |                       |
|------------------------------------------------|---------------|--------------------|---------|-----------------------|
| Операционная карта<br>технического<br>контроля | № ПП (К, цех) | Обозначение детали | № опер. | Наименование операции |
|                                                | 80            | 22РГ.330.002       | 025     | Контроль              |



1. \*Размеры для справок.
2. Допустимое отклонение от 3D-модели IT17/2.

[illegible][illegible]