

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

ОЛЕЙНИК МАКСИМ АНДРЕЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО  
ВЫРАЩИВАНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЗАГОТОВОК  
КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ ГТД**

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

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ПОЛУЧЕНИЯ ЗАГОТОВОК КРУПНОГАБАРИТНЫХ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ ГОРЯЧЕЙ ОБЛАСТИ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ГТД .....	12
1.1 Основные понятия аддитивных технологий применительно к установкам прямого лазерного выращивания .....	12
1.2 Технологические ограничения современных установок ПЛВ .....	18
1.3 Современное состояние проблемы получения заготовок на установках ПЛВ.....	22
Выводы по главе 1 .....	29
ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИЙ МНОГООСЕВОЙ НАПЛАВКИ ПО ТЕХНОЛОГИИ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ ДЛЯ РОБОТИЗИРОВАННЫХ УСТАНОВОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДВУХОСЕВОГО ПОЗИЦИОНЕРА .....	31
2.1 Формулировка кинематических ограничений для системы управления роботом и позиционером.....	31
2.2 Постановка задачи совместного управления роботом и позиционером	32
2.3 Разработка математической модели формирования траекторий многоосевой наплавки .....	33
2.4 Численные эксперименты .....	40
Выводы по главе 2 .....	43
ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА СРЕДСТВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ ПРОГРАММ ДЛЯ РОБОТИЗИРОВАННЫХ УСТАНОВОК ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ.....	44
3.1 Формализация общей задачи управления роботом в нотации ДН- параметров .....	44

3.1.1 Решение прямой задачи кинематики .....	47
3.1.2 Решение обратной задачи кинематики .....	50
3.2 Разработка общей концепции конвертора представления траектории инструмента для решения обратной задачи связки робот-позиционер .....	59
3.3 Разработка решателя обратной задачи с использованием Open Source библиотек .....	60
Выводы по главе 3 .....	68
<b>ГЛАВА 4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОГРАНИЧЕНИЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЗАГОТОВОК КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ ГТД .....</b>	<b>70</b>
4.1 Технологические ограничения .....	70
4.2 Модель формирования слоев с учетом технологических ограничений. 83	
4.2.1 Модель формирования внешних и внутренних контуров и области заполнения .....	83
4.2.2 Модель генерации УП с учетом использования позиционера .....	88
4.3 Разработка технического задания для программной реализации в САМ- системе «АДЕМ» .....	91
4.4 Апробация разработанного функционала .....	94
Выводы по главе 4 .....	103
<b>ГЛАВА 5 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЗАГОТОВОК КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ ГТД .....</b>	<b>104</b>
Выводы по главе 5 .....	114
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>115</b>
Перечень сокращений и обозначений .....	118
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>120</b>
Приложение А Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2024620533 .....	132

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Тенденция развития машиностроения направлена на усложнение конструкций всех узлов, агрегатов и изделий. В производстве газотурбинных двигателей (ГТД), используемых в авиации и энергетике, постоянно повышается эффективность работы и снижается масса. Это приводит к необходимости создания тонкостенных деталей и применению новых материалов.

Изготовление тонкостенных крупногабаритных корпусных деталей ГТД характеризуется большой трудоёмкостью и высоким расходом материала на этапах механической обработки вследствие необходимости назначения больших припусков для достижения требуемого качества поверхности. Особенную сложность вызывает изготовление деталей горячей области проточной части ГТД из жаропрочных труднообрабатываемых сплавов. Традиционно тонкостенные крупногабаритные корпусные заготовки деталей ГТД получают путем раскатки колец с последующей сваркой. При этом на обрабатываемые поверхности накладывают большой припуск (5 мм и более) и напуски.

Применение аддитивных технологий для изготовления тонкостенных крупногабаритных заготовок, в частности прямого лазерного выращивания (ПЛВ) на роботизированных установках, оправдано, поскольку данная технология позволяет получать заготовки, приближённые по форме к деталям. Несмотря на это, заготовки, получаемые по технологии ПЛВ, не удовлетворяют требованиям по размерной точности, вследствие чего необходимо предусматривать припуск (2 мм и более) на обрабатываемые поверхности заготовок. К одной из причин, приводящих к снижению размерной точности, относится несовершенство программного обеспечения (САМ-системы), с помощью которого формируются траектории наплавки, не учитывающего специфику процесса ПЛВ и кинематику роботизированной ячейки, а также ряд других проблем, требующих исследования.

Наиболее удачной компоновкой установок ПЛВ с точки зрения обеспечения выращивания крупногабаритных заготовок является компоновка, состоящая из шестиосевого робота, на котором установлен наплавочный инструмент, и двухосевого позиционера, на столе которого выращивается заготовка. При этом чем крупнее заготовка, тем больший вылет робота необходим для обеспечения выращивания. Это приводит к уменьшению точности позиционирования робота и, как следствие, уменьшению точности выращивания, что, на сегодняшний день, компенсируется увеличением припуска на обрабатываемые поверхности.

С точки зрения точности позиционирования оптимальным взаимным положением робота и позиционера является то, при котором робот имеет наименьший вылет относительно собственной базы. С учётом обеспечения инструментальной доступности и исключения сингулярных положений, рациональной рабочей зоной инструмента в данной компоновке будет являться пространство вблизи плоскости, перпендикулярной оси наклона позиционера. Однако такого позиционирования проблематично достичь из-за наличия большого количества подвижных осей, что приводит к появлению неконтролируемых паразитных движений во время наплавки. Это явление не только снижает точность получения заготовок, но и может привести к повреждению наплавочного инструмента и его компонентов.

На сегодняшний день эта проблема частично решается заданием ограничений движения по осям и присвоением приоритета движения для каждой оси в САМ-системе. Однако данный способ является трудоёмким из-за последовательного внесения правок и проведения многочисленных симуляций движения робота до достижения требуемого результата, а также низкоэффективным из-за того, что вышеописанная проблема может решиться не полностью.

**Степень разработанности темы.** Проведённый анализ работ, публикуемых в мире по данной проблематике, говорит об интересе

исследователей к данной теме и её актуальности, так как всё чаще применяются аддитивные технологии для выращивания сложных изделий.

Вопросами использования аддитивных технологий в производстве сложнопрофильных заготовок авиационных ГТД занимались многие отечественные и зарубежные учёные: Г.А. Туричин, О.Г. Оспенникова, Л.А. Магеррамова, Д.Н. Трушников, Д.Ю. Колодяжный, Е.В. Земляков, К.Д. Бабкин, В.Г. Смелов, А.В. Балякин, А.В. Сотов, В.П. Алексеев, А.М. Вильданов, В.В. Исаков, И.С. Мазалов, О.М. Огородникова, А.В. Рипецкий, В.Г. Низьев, О.П. Решетникова, Р.М. 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.

Вопросами создания управляющих программ для промышленных роботов в САМ-системах занимались учёные: Н. Конов, А.А. Ловыгин, С.Г. Серегин, М.А. Горькавый, П.А. Ведмидь, А.В. Сулинов и другие.

Обзор современного состояния САМ-систем применительно к технологии прямого лазерного выращивания показал недостаточную проработанность программного обеспечения и готовность к созданию полностью законченных управляющих программ для аддитивного производства.

**Цель работы.** Повышение коэффициента использования материала и сокращение трудоёмкости изготовления крупногабаритных осесимметричных заготовок корпусных деталей ГТД по технологии прямого лазерного выращивания на роботизированных установках на основе разработки методики, обеспечивающей получение заготовок, близких по форме к готовым деталям, за счёт формирования рациональных траекторий наплавки.

**Задачи исследования:**

1. Выполнить анализ проблемы получения крупногабаритных осесимметричных заготовок корпусных деталей ГТД с учётом назначения рационального припуска.

2. Разработать математическую модель формирования траекторий многоосевой наплавки для формообразования заготовок деталей ГТД по технологии прямого лазерного выращивания на роботизированных установках с использованием двухосевого позиционера.

3. Разработать средства технологической подготовки для создания управляющих программ для роботизированных установок прямого лазерного выращивания на базе математической модели формирования траекторий многоосевой наплавки крупногабаритных заготовок деталей авиационных ГТД.

4. Выявить и систематизировать ограничения технологии прямого лазерного выращивания с целью их учёта при формировании траекторий многоосевой наплавки для роботизированных установок прямого лазерного выращивания и в интерфейсе пользователя САМ-систем.

5. Разработать методику прямого лазерного выращивания крупногабаритных заготовок корпусных деталей ГТД и апробировать её изготовлением крупногабаритной заготовки детали авиационного ГТД на роботизированной установке прямого лазерного выращивания.

**Объект исследования.** Технологические процессы производства крупногабаритных осесимметричных заготовок корпусных деталей авиационных ГТД.

**Предмет исследования.** Крупногабаритные осесимметричные заготовки корпусных деталей авиационных ГТД, полученных по технологии прямого лазерного выращивания на специальном оборудовании для формообразования.

**Научная новизна работы:**

1. Разработана математическая модель формирования траекторий многоосевой наплавки для формообразования крупногабаритных заготовок корпусных деталей ГТД по технологии прямого лазерного выращивания на роботизированных установках с использованием двухосевого позиционера, отличающаяся от известных решений возможностью формирования

рациональных траекторий при выращивании элементов, близких по форме к осесимметричным.

2. Сформулированы ограничения технологии прямого лазерного выращивания крупногабаритных заготовок корпусных деталей ГТД с целью формирования траекторий многоосевой наплавки, отличающиеся от ранее известных систематизацией и адаптацией траекторий через предложенный интерфейс пользователя САМ-систем.

3. Разработана методика прямого лазерного выращивания крупногабаритных заготовок корпусных деталей ГТД, отличающаяся от известных аналогов использованием оригинального алгоритма многоуровневого выращивания для сокращения времени генерации управляющих программ и включающая в себя математическую модель формирования траекторий многоосевой наплавки.

**Теоретическая значимость работы** заключается в создании математической модели формирования траекторий многоосевой наплавки по технологии ПЛВ для роботизированных установок с использованием двухосевого позиционера, учитывающей сохранение заданной ориентации инструмента в пространстве, а также обеспечение выращивания крупногабаритных заготовок деталей за счёт использования поворотной оси позиционера. Также теоретическая значимость заключается в создании алгоритма многоуровневого выращивания, за счёт которого происходит копирование траекторий слоя на последующие слои до определенного значения.

#### **Практическая значимость работы**

Практическая значимость заключается в создании траекторий, приспособленных под кинематику совместного движения промышленного робота и позиционера для выращивания крупногабаритных осесимметричных заготовок деталей ГТД, что, во-первых, повышает точность технологии прямого лазерного выращивания, а, во-вторых, обеспечивает технологу возможности задания технологических параметров для каждой траектории

при создании управляющих программ. Использование алгоритма многоуровневого выращивания позволяет существенно снизить время генерации управляющих программ и, как следствие, трудоёмкость выращивания. Установлены технологические ограничения роботизированной многоосевой наплавки по технологии ПЛВ для использования в интерфейсе пользователя САМ-систем для расчёта траекторий наплавки на роботизированных установках.

### **Содержание диссертации**

Область исследования по содержанию, объекту и предмету 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» направлений исследований паспорта научной специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов (технические науки).

### **Методы исследований**

В работе использовались численные и экспериментальные методы исследования. Разработка и апробация математических моделей осуществлялись с использованием интегрированной среды разработки Spyder на языке Python.

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.

### **На защиту выносятся следующие положения:**

1. Математическая модель формирования траекторий многоосевой наплавки для формообразования заготовок деталей ГТД по технологии

прямого лазерного выращивания на роботизированных установках с использованием двухосевого позиционера.

2. Ограничения технологии прямого лазерного выращивания с целью их учёта при формировании траекторий многоосевой наплавки.

3. Методика прямого лазерного выращивания крупногабаритных заготовок корпусных деталей ГТД.

### **Обоснованность и достоверность работы**

Обоснованность и достоверность выдвинутых в диссертации положений, сделанных выводов, предложенных рекомендаций и итоговых заключений обеспечиваются точностью применяемого лабораторного оборудования, позволяющего провести сравнение результатов экспериментов с численными и аналитическими расчётами. Результаты расчётных данных верифицированы проведенными экспериментами на поверенном оборудовании.

### **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.); 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» (г. Самара, июнь 2023 г., июнь 2025 г.); Всероссийском научно-техническом форуме по двигателям и энергетическим установкам имени Н.Д. Кузнецова (г. Самара, октябрь 2024 г.).

Результаты диссертационной работы в виде методики прямого лазерного выращивания крупногабаритных заготовок корпусных деталей ГТД внедрены на ПАО «ОДК-Кузнецов» и АО «Самарские авиадвигатели», что подтверждается соответствующими актами внедрения. Разработано техническое задание на разработку модуля для аддитивного производства в САМ-системе и получен акт внедрения от ООО «Крона»,

разработчика CAD/CAM «ADEM». Материалы диссертационной работы нашли применение в учебном процессе Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева.

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 11 работ, в том числе 6 статей опубликовано в рецензируемых периодических изданиях, рекомендованных ВАК России, 3 статьи опубликованы в изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, и одно свидетельство о государственной регистрации базы данных.

### **Структура и содержание диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 95 наименований. Общий объём диссертации составляет 132 страницы, 63 рисунка и 12 таблиц.

# ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ПОЛУЧЕНИЯ ЗАГОТОВОК КРУПНОГАБАРИТНЫХ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ ГОРЯЧЕЙ ОБЛАСТИ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ГТД

## 1.1 Основные понятия аддитивных технологий применительно к установкам прямого лазерного выращивания

В национальном стандарте ГОСТ Р 57558-2017/ISO/ASTM 52900:2015 «Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 1» выделяют семь процессов аддитивного производства:

- струйное нанесение связующего;
- прямой подвод энергии и материала;
- экструзия материала;
- струйное нанесение материала;
- синтез на подложке;
- листовая ламинация;
- фотополимеризация в ванне [1].

Производство металлических изделий с помощью аддитивных технологий можно разделить на непосредственное и косвенное [2-5]. Непосредственное получение заготовок из сплава позволяет выращивать изделия сразу из CAD-модели. К такому способу можно отнести процессы синтеза на подложке, струйного нанесения связующего, прямого подвода энергии и материала и листовой ламинации. Остальные процессы подразумевают косвенное получение металлических изделий, путем первоначального создания мастер-моделей, компонентов литниково-питающей системы и т.п.

В настоящее время для непосредственного получения металлических изделий популярны процессы синтеза на подложке и прямого подвода энергии и материала, которые нашли применение в технологиях селективного

лазерного сплавления (в зарубежной литературе selective laser melting, SLM) и прямого лазерного выращивания (в зарубежной литературе direct metal deposition, DMD) соответственно [6].

На рисунке 1.1 показана схема классификации процесса прямого подвода энергии и материала.



Рисунок 1.1 – Классификация технологий прямого подвода энергии и материала

В зависимости от типа подводимой энергии процесс прямого подвода энергии и материала подразделяется на подвод энергии за счет тепла и за счет кинетической энергии подаваемого материала. К последнему относят различные типы газодинамического напыления [7, 8].

Подвод энергии за счет тепла осуществляется с помощью лазерного пучка, электронного пучка, плазменного пучка и электрической дуги.

В случае подвода энергии в зону расплава с помощью лазера, сырьем для выращивания изделия может быть металлический порошок или металлическая проволока [9-12]. Во избежание снижения качества сплавляемого материала процесс должен осуществлять в атмосфере инертного газа, например, аргона. На рисунке 1.2 показана условная схема реализации технологии прямого подвода энергии и материала при использовании в качестве источника энергии лазерное излучение.

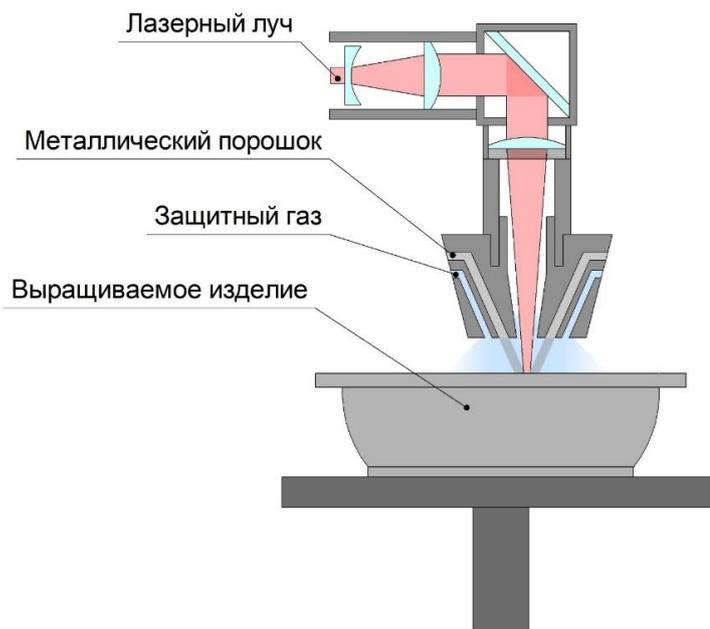


Рисунок 1.2 – Подвод энергии за счет лазерного излучения

При использовании технологии прямого подвода энергии и материала, где в качестве источника тепловой энергии выступает электронный пучок (EB-DED) применение металлического порошка невозможно ввиду того, что процесс выращивания осуществляется в контролируемом вакууме, из-за чего подвод порошкового материала в зону сплавления затруднен (рисунок 1.3) [13, 14]. В этом случае сырьем выступает металлическая проволока.

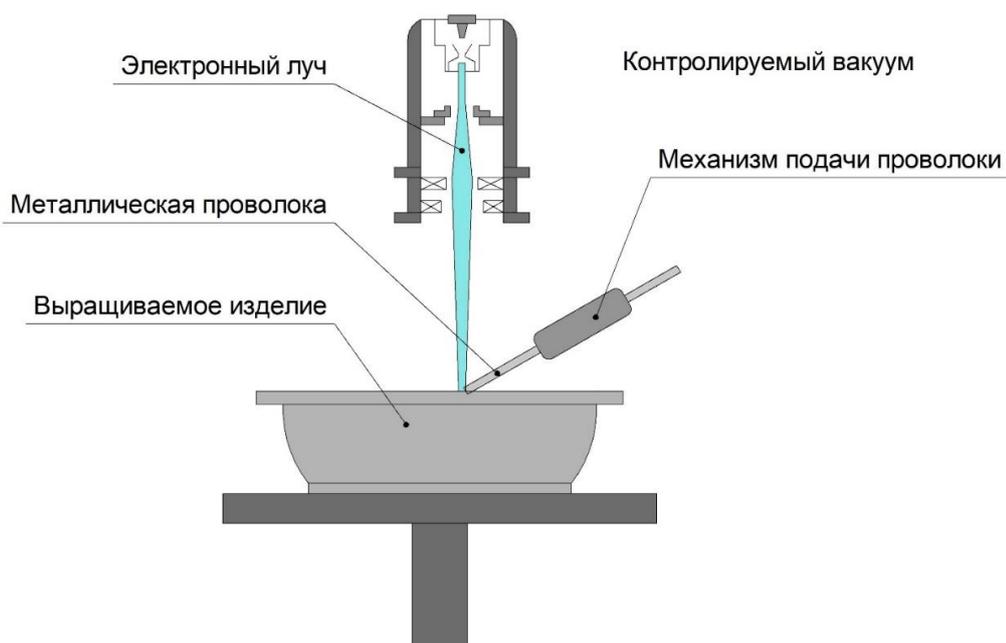


Рисунок 1.3 – Подвод энергии за счет электронного пучка

Использование плазменного пучка и электрической дуги в качестве подводимой энергии выносятся в отдельную категорию. В зарубежной литературе она носит название wire-arc additive manufacturing или аддитивное производство методом дуговой сварки [15, 16]. В этой категории выступают 3 технологии:

- выращивание с использованием неплавящегося электрода (GTA-DED), аналог TIG-сварки (рисунок 1.4) [17, 18];

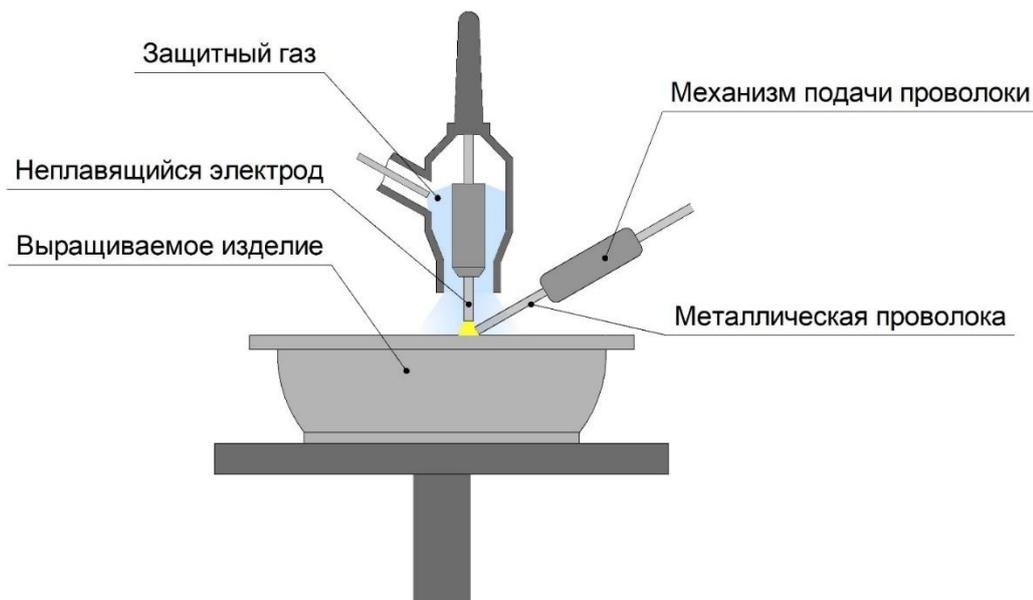


Рисунок 1.4 – Выращивание с использованием неплавящегося электрода

- электродуговое выращивание плавящимся электродом (GMA-DED), аналог MIG-сварки (рисунок 1.5) [19-21];

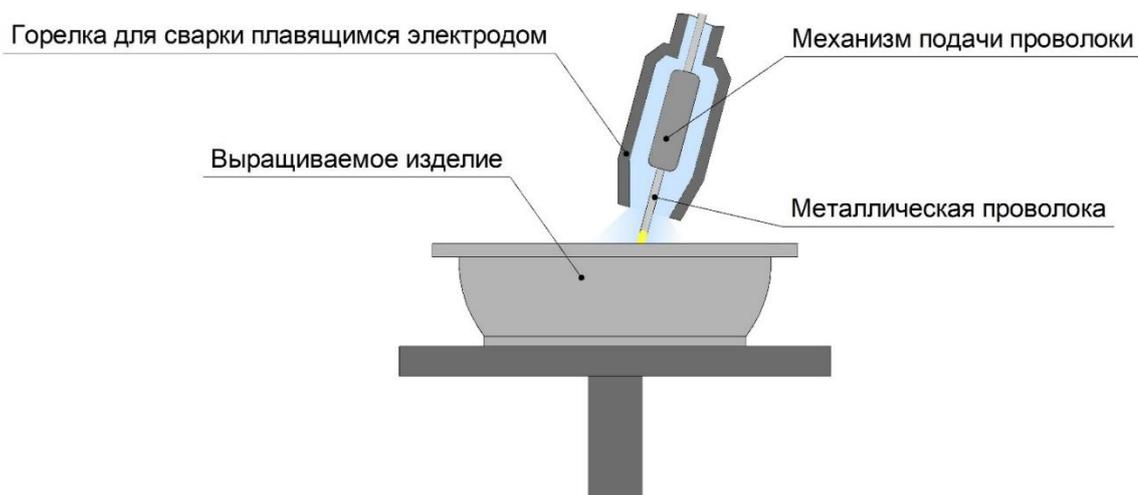


Рисунок 1.5 – Электродуговое выращивание плавящимся электродом

- выращивание с использованием плазменного электрода (РА-DED) (рисунок 1.6). Ввиду более стабильного протекания процесса, возможно использование в качестве исходного материала не только проволоки, но и порошка [22].

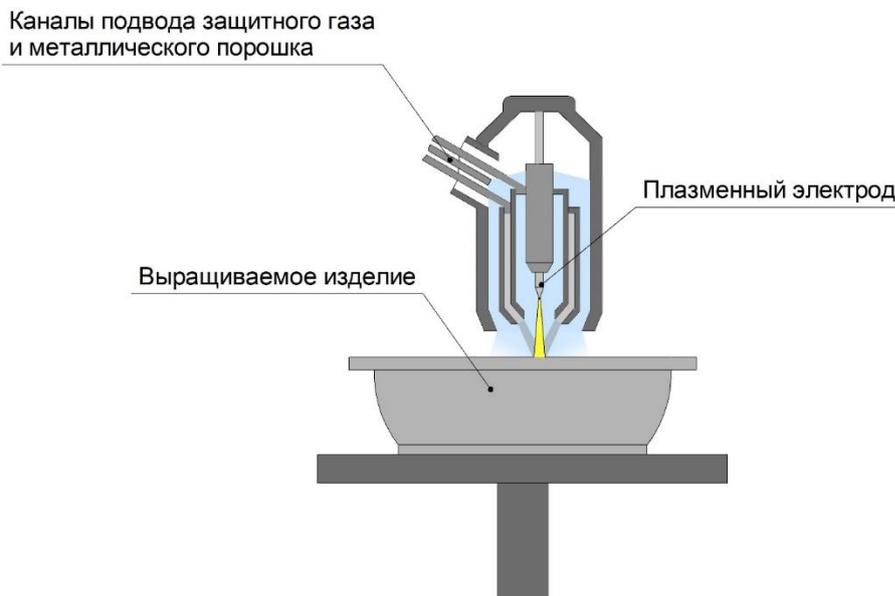


Рисунок 1.6 – Выращивание с использованием плазменного электрода

Наиболее используемыми являются технологии прямого лазерного выращивания, где в качестве материала используется металлический порошок, и электродуговое выращивание в среде газа с сырьем в виде металлической проволоки.

Во всех вышперечисленных технологиях присутствуют понятия, определяющие технологический режим, а именно: скорость выращивания, ширина и высота валика и подводимая мощность [23-25].

Здесь и далее скорость выращивания следует рассматривать как скорость движения рабочего инструмента, а не как производительность процесса. Производительность процесса бывает объемная и фактическая. Объемная зависит от скорости движения и геометрии формирующегося валика, которая определяется по формуле:

$$Q_0 = V \cdot W \cdot H,$$

где  $Q_0$  – объемная производительность процесса, мм<sup>3</sup>/с,

$V$  – скорость движения рабочего инструмента, мм/с,

$W$  – ширина валика, мм,

$H$  – высота валика, мм.

Величина  $Q_0$  лежит в диапазоне от 12 до 50 мм<sup>3</sup>/с. Выход за пределы данного диапазона возможен, однако сопровождается значительным снижением устойчивости процесса выращивания.

Фактическая производительность процесса определяется по формуле:

$$Q = Q_0 \cdot KЭП,$$

где КЭП – коэффициент эффективности процесса, зависящий от количества порошка, попавшего в ванну расплава и внешних условий, которые могут повлиять на процесс выращивания,

$$KЭП = \frac{KЗП}{KЗУ},$$

где КЗП – коэффициент захвата порошка, КЗУ – коэффициент запаса устойчивости. Более подробно КЗП и КЗУ описаны в главе 4.

Фактическая производительность процесса является динамической величиной, ввиду непрерывного изменения коэффициента захвата порошка, который может быть в диапазоне от 0,8 до 1,0. В свою очередь, КЗУ является статичной величиной, которая закладывается на этапе подготовки технологической подготовки, в частности, при расчете массового расхода порошка. Таким образом, фактическая производительность процесса всегда меньше геометрической, поэтому при выборе режима выращивания технолог должен учитывать КЭП, чтобы определить количество порошка, которое необходимо для выращивания изделия.

На рисунке 1.7 показана иллюстрация формирования единичного валика на примере технологии прямого лазерного выращивания, где показаны основные геометрические размеры валика.

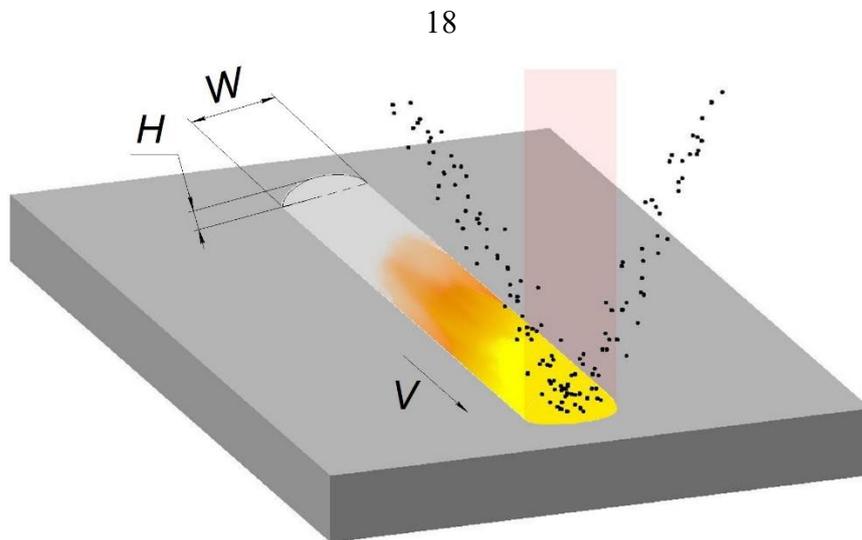


Рисунок 1.7 – Формирование единичного валика

## 1.2 Технологические ограничения современных установок ПЛВ

Установки прямого лазерного выжигания с точки зрения кинематической схемы разделяются на две группы: 5-осевые и 8-осевые. К первой группе относят установки, выполненные на базе 5-осевых обрабатывающих центров, в которых рабочий инструмент линейно движется вдоль осей X, Y, Z, а стол, на котором фиксируется заготовка, поворачивается вокруг осей X и Z (оси A и C). Схема такой компоновки на базе фрезерного станка с ЧПУ показана на рисунке 1.8.

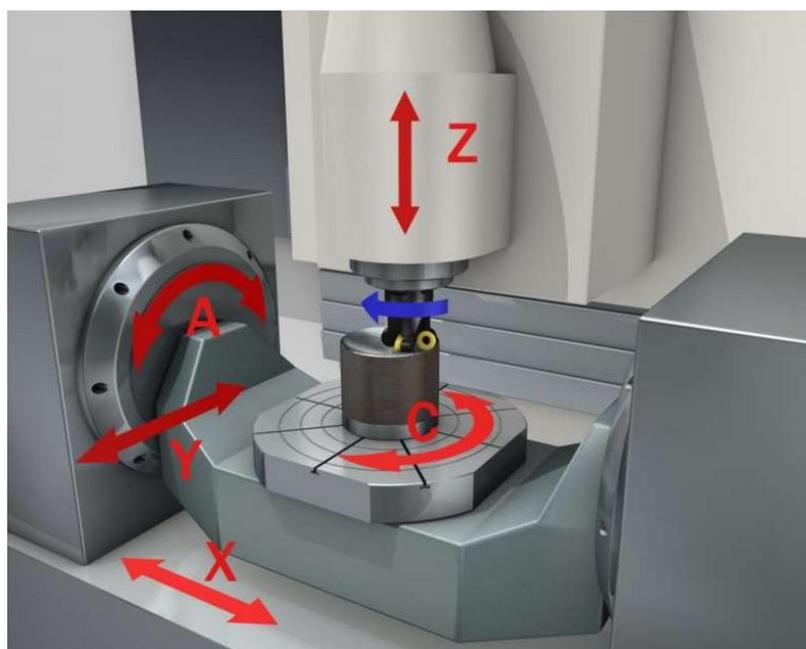


Рисунок 1.8 – Компоновка 3+2 на базе обрабатывающего центра

Установки данной конфигурации производят в России (ИЛИСТ) [26], США (POM Group, Optomec, Sciaky) [27-29], Франции (Irepa Laser) [30], Германии (DMG MORI, TRUMPF) [31, 32], Южной Кореи (InssTek) [33] и Японии (Mazak) [34]. Поскольку с точки зрения кинематики такие установки соответствуют обрабатывающим центрам, по такой схеме изготавливают и гибридные установки, сочетающие в себе аддитивные и субтрактивные технологии. На рисунке 1.9 показана гибридная пятиосевая установка компании Optomec.



Рисунок 1.9 – Гибридный обрабатывающий центр

К преимуществам такой компоновки относят:

- возможность повышения контроля процесса за счет установки в наплавочный инструмент большого количества датчиков, которые дают расширенную картину процесса выращивания;
- возможность объединения аддитивных и субтрактивных технологий;
- возможность ремонта поврежденных частей деталей.

Среди недостатков выделяют:

- небольшие габариты рабочей зоны;
- невозможность вторичного использования порошка при гибридной обработке;
- ограничения по форме заготовок из-за сниженной инструментальной доступности.

Ко второй группе кинематических схем установок прямого лазерного выращивания относятся машины, в которых движение инструмента обеспечивает шестиосевой робот-манипулятор [26, 27]. Установки такого типа менее распространены, однако они имеют ряд преимуществ перед пятиосевой схемой:

- увеличенная область построения;
- высокая гибкость, позволяющая выращивать более сложные изделия;
- высокая степень переналаживаемости;
- модернизируемость.

На рисунке 1.10 показана установка ИЛИСТ-L+, оснащенная шестиосевым роботом и двухосевым позиционером.



Рисунок 1.10 – Роботизированная установка прямого лазерного выращивания

Самой крупногабаритной роботизированной установкой прямого лазерного выращивания является «ИЛИСТ-2XL», поэтому на сегодняшний день технологические ограничения технологии ПЛВ соответствуют характеристикам вышеобозначенной установки, которые представлены в таблице 1.1 [35].

Таблица 1.1 – Технологические ограничения РУПЛВ

Размер выращиваемого изделия, мм	Ø2200×1000
Максимальный вес изделия, кг	4000
Производительность, см <sup>3</sup> /ч	250
Высота слоя, мм	0,3-1,0
Шероховатость выращенной поверхности, мкм	Ra25
Используемые материалы	Алюминиевые сплавы: АМг6, 1597, 1575, ER 5356 Титановые сплавы: Ti, Ti-6Al-4V, BT6, BT-0 Нержавеющие стали: 12X18H10T, 08X18H10T, 316L Бронзовые сплавы: БрХ08, БрА10 Хромоникелевые сплавы: ЭП648, ВЖ159, Inconel 625, Inconel 718

К недостаткам такой компоновки относят следующие:

- пониженная точность позиционирования и повторяемости;
- сложность в настройке инструмента, а также в синхронизации работа и позиционера;
- ограниченная нагрузка на фланец робота, что уменьшает количество сенсоров, которые можно установить на инструмент;
- большой объем кабины, который необходимо заполнять инертным газом;
- отсутствие готового решения для подготовки управляющих программ.

Последний недостаток является наиболее значимым, поскольку подготовка управляющей программы является самым трудоемким этапом технологической подготовки аддитивного производства для установок,

работающих по методу прямого подвода энергии и материала. На сегодняшний день управляющие программы для роботизированных установок ПЛВ создаются средствами CAD/CAM-пакетов с применением модулей аддитивной обработки.

### **1.3 Современное состояние проблемы получения заготовок на установках ПЛВ**

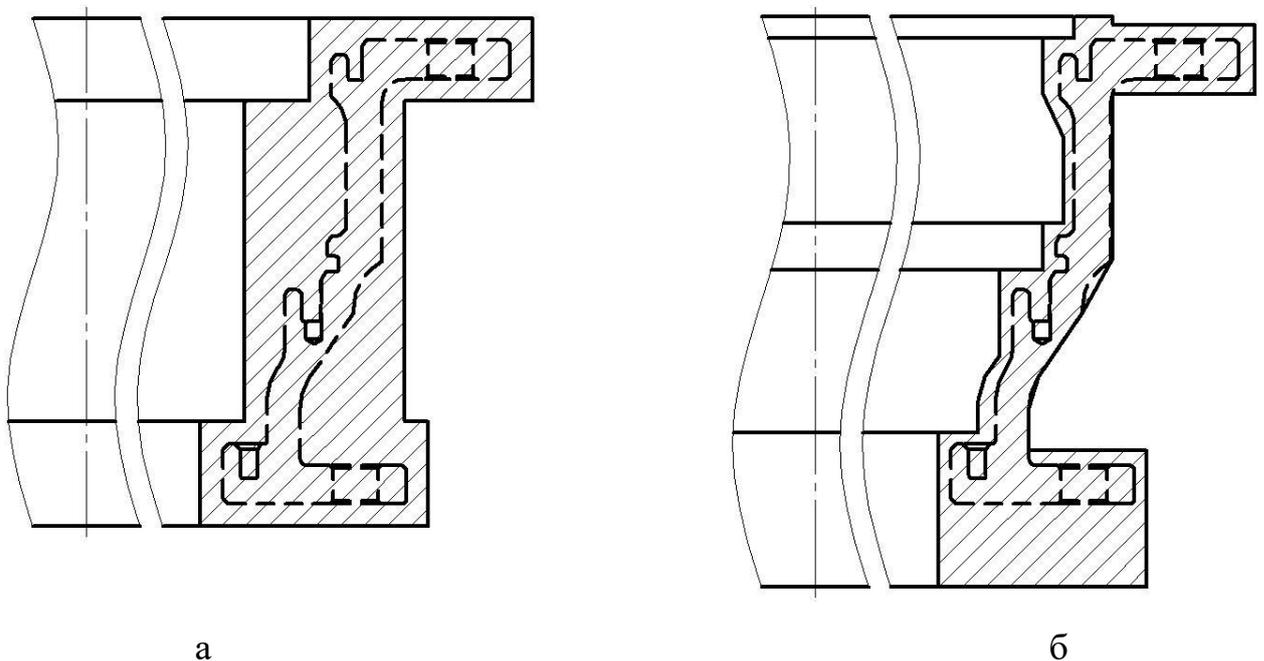
Производство крупногабаритных корпусных деталей традиционно базируется на применении технологий, использующих предварительно изготовленные бесшовные кольца. Эти кольца получают методом раскатки, после которой следуют этапы сварки и механической обработки. Однако данная технология обладает целым рядом существенных недостатков, среди которых выделяются дороговизна и трудоёмкость процесса, требующего высокой точности изготовления и строгого соблюдения технологических норм.

Основной проблемой традиционной технологии изготовления бесшовных колец является длительный цикл производства. Раскатка занимает значительное время, что замедляет общий производственный процесс. Дополнительные стадии подготовки и доводки, такие как сварка и механическая обработка, увеличивают продолжительность и сложность всего цикла.

Кроме того, высокие требования к точности исполнения накладывают дополнительные ограничения на технологию раскатки. Нарушение установленных стандартов ведет к ухудшению эксплуатационных качеств деталей, вплоть до выхода их из строя.

Еще одним серьезным аспектом являются экономические потери, обусловленные низким коэффициентом использования материала. При традиционном подходе значительная доля материала теряется в виде отходов, что отрицательно сказывается на рентабельности производства.

Одним из перспективных направлений для преодоления указанных ограничений является внедрение аддитивных технологий, таких как прямое лазерное выращивание, в качестве альтернативного варианта получения заготовок крупногабаритных осесимметричных деталей. Эта технология позволяет получать заготовки, приближенные по форме к готовым деталям, уменьшая число операций механической обработки и повышая коэффициент использования материала. На рисунке 1.11 показаны эскизы заготовок детали с целью сравнения способов изготовления.



а – заготовка по традиционной технологии, б – заготовка по технологии ЛПВ

Рисунок 1.11 – Сравнение способов изготовления

При этом масса заготовки, полученной по технологии ЛПВ, составляет 33,5 кг, а масса заготовки, полученной по традиционной технологии (раскатка колец), составляет 48,1 кг. Отсюда видно, что технология ЛПВ позволяет уменьшить припуск на обработку за счёт возможности получения точных заготовок. Анализ типовых крупногабаритных осесимметричных корпусных деталей и типовых методов их получения и механической обработки показал, что экономия материала при внедрении технологии ЛПВ возрастает в 1,2-3 разаю

Технология прямого лазерного выращивания позволяет получать крупногабаритные сложнопрофильные заготовки деталей авиационных ГТД с минимальной толщиной стенок от 1 мм и более. Для её реализации требуется применение автоматизированных систем для подготовки управляющих программ (САМ-системы), поскольку число траекторий в управляющих программах может достигать нескольких миллионов и человеку запрограммировать такое количество вручную не представляется возможным. Помимо создания самих траекторий, где должны быть записаны координаты и ориентация инструмента, необходимо задавать вид движения инструмента (линейный, круговой, шарнирный), а также использовать технологические команды, такие как включение/выключение лазера с определением необходимой мощности, включение/выключение подачи порошка и т.д. Наиболее часто используемые САМ-системы для создания управляющих программ для роботизированных установок прямого лазерного выращивания заготовок деталей авиационных ГТД являются NX, PowerMill, hyperMILL, SprutCAM. В них присутствует модуль для создания аддитивных операций, а также внутренний верификатор обработки, поддерживающий роботизированную лазерную наплавку.

С появлением систем числового управления и средств автоматизированного проектирования мир производства перешел от дизайнеров с аналоговыми чертежными инструментами и высококвалифицированных операторов станков к полностью цифровому предприятию – от 3D-рендеринга компонентов до 5-осевого программирования станков. Независимо от того, используется ли аддитивный или субтрактивный процесс, станок может быть запрограммирован на преобразование исходного материала в конечную заданную геометрию.

Для операций субтрактивного производства САМ-система была представлена в 1960-х годах и с тех пор получила широкое распространение [36,37]. Существует множество программных платформ, которые предлагают планирование траектории движения инструмента и большинство из них

предлагают достаточные решения для повседневных традиционных операций субтрактивной обработки. С внедрением гибридного производственного оборудования в коммерческий сектор многие САМ-системы для механической обработки теперь предлагают планирование траектории движения инструмента для аддитивного производства.

Для эффективной обработки детали инструмент должен иметь досягаемость и доступ ко всем поверхностям, подлежащим механической обработке, чтобы преобразовать исходную заготовку в деталь конечного размера. Программное обеспечение САМ-систем учитывает геометрию инструмента, геометрию заготовки и геометрию конечного компонента для создания соответствующей траектории движения инструмента. По мере усложнения конструкции компонентов доступ к инструменту становится все более затруднительным. При обработке дорогостоящих деталей, где чистота поверхности имеет решающее значение, динамическое движение инструмента так же важно, как и его положение в пространстве [38]. Процесс создания этих траекторий хорошо разработан и хранится многими компаниями как интеллектуальная собственность. По мере того, как коммерческие САМ-системы становились все более распространенными, разработка перешла от фундаментальной генерации траекторий движения инструмента к методам оптимизации [39-42].

Перед выполнением планирования траектории движения инструмента важным этапом работы в САМ-системе является разбиение 3D-модели на подобъемы, к которым затем могут быть применены отдельные траектории движения инструмента. Этот процесс часто называют декомпозицией, который является важным этапом многих изделий, производимых гибридным производством. Большие выступы, требующие многоосевой обработки как для аддитивного, так и для субтрактивного производства, должны быть организованы в надлежащем порядке, чтобы избежать столкновений [43].

Исследователи работали над созданием траектории движения инструмента для многоосевой аддитивной [44-46] и гибридной обработки [47-

50]. Однако в большинстве коммерческих пакетов программного обеспечения САМ-систем этот процесс по-прежнему выполняется вручную.

Существует множество вариантов планирования траектории движения инструмента для аддитивного производства, начиная от программ с открытым исходным кодом и заканчивая коммерчески доступными промышленными программными пакетами [51, 52]. Однако большая часть разработок на сегодняшний день была посвящена плоскостному нарезанию [53-55]. Поскольку аддитивные САМ-системы становятся все более сложными, многие разработчики используют существующие стратегии обработки для создания аддитивных траекторий движения инструмента. Вместо того чтобы генерировать траекторию аддитивную инструмента напрямую, сначала генерируется траектория режущего инструмента, которая обрабатывает геометрию, подлежащую печати [56]. Это сгенерированное движение впоследствии реверсируется для достижения желаемого аддитивного движения. Эта стратегия генерации является общей для многих крупных поставщиков САМ-систем, таких как Open Mind и Autodesk.

Подобно тому, как траектория движения субтрактивного инструмента влияет на общую чистоту поверхности и точность конечного компонента, стратегии обработки для аддитивного производства оказывают прямое влияние на геометрические и механические свойства получаемого изделия [57-59]. Решения, которые программист принимает во время процесса генерации траекторий, могут по-разному повлиять на конечный результат выращенной заготовки. Большую часть литературы по разработке DED-технологий можно разделить на две категории: оптимизация геометрической точности и оптимизация характеристик материала. Результирующие траектории аддитивных инструментов из этих двух категорий часто имеют разные результаты. То же самое можно сказать и о формировании траектории движения инструмента для гибридных технологий производства. Стратегии создания независимых аддитивных и субтрактивных траекторий движения инструмента, а также их чередования различаются в зависимости от того,

требуются ли хорошие металлургические или геометрические характеристики.

Многие программные пакеты для создания траекторий движения инструмента позволяют пользователю моделировать траектории движения инструмента с учетом геометрии оснастки, чтобы предсказать возможные столкновения во время обработки. Это моделирование может выполняться с помощью программного обеспечения САМ-систем, внешних симуляторов или на симуляторе станка. Возможности моделирования могут варьироваться от простого построения траектории движения инструмента до полной кинематики станка с закреплением заготовки, запасом материала и геометрией станка. Моделирование генерации траектории движения инструмента можно использовать для проверки направления инструмента и быстрых перемещений, однако геометрия инструмента часто не учитывается при таком типе моделирования. Простая 3D траектория движения инструмента может быть визуализирована во многих САМ-системах, а также в программах и алгоритмах визуализации с открытым исходным кодом и в режиме онлайн [60]. Следующий уровень моделирования траектории инструмента – когда геометрия инструмента динамически моделируется вдоль траектории инструмента, чтобы пользователь мог оценить взаимодействие траектории инструмента относительно конечной геометрии [61]. Чтобы этот тип моделирования был эффективным, необходимо смоделировать геометрию инструмента и держателя. Визуализация столкновения является такой же точной, как и модель оснастки, с учетом вылета инструмента из держателя, а также точности геометрии держателя. Перемещение держателя инструмента моделируется вдоль траектории движения инструмента относительно геометрии САД-модели. Также может быть выполнено полное кинематическое моделирование станка, чтобы проверить, нет ли каких-либо перемещений, которые могли бы привести к ошибкам обработки, при моделировании перемещений всех осей. Моделирование может показать, что экстремальные скорости могут превышать возможности станка, особенно при

5-осевой обработке поверхности. Этот тип моделирования поддерживается некоторыми современными программными средствами и алгоритмами САМ-систем [62]. Многие производители станков также интегрировали в свои контроллеры моделирование и обнаружение столкновений. К таким производителям относятся, например, DMG Mori с системой управления защитой станков, Okuma с системой предотвращения столкновений и Mazak с интеллектуальным защитным экраном [63]. Кроме того, программное обеспечение для моделирования обработки, такое как VERICUT, может использоваться для имитации загруженного G-кода с целью проверки окончательной геометрии и определения потенциального столкновения или удаления излишков материала режущим инструментом [64].

Предотвращение столкновений для аддитивного производства аналогично предотвращению столкновений для механической обработки. Моделируется соответствующая геометрия и программное обеспечение обеспечивает безопасное перемещение по заготовке. Во время этого процесса генерации траектории движения инструмента программист задает постоянную высоту наращивания слоя до желаемой высоты заготовки. Если происходит перерастание или недорост заготовки, большинство станков не имеют автоматической интегрированной системы, специально предназначенной для определения геометрии. Чтобы снизить риски столкновений, исследователи изучают интеграцию таких систем, как структурированное световое сканирование, в гибридные машины DED для управления с замкнутым контуром [65-67]. Кроме того, системы контроля, интегрированные в станки OEM, такие как TMAC, предлагаемые Caron Engineering, способны измерять текущую нагрузку и вибрации станка сверх ожидаемой нагрузки, что может помочь предотвратить катастрофические повреждения [68].

Различные производители программного обеспечения САМ-систем разрабатывают стратегии управления производительностью станков с помощью компьютера, такие как hyperMILL CONNECTED Machining [69]. Такая двусторонняя передача данных позволяет пользователю лучше

управлять станком, например, принудительно выполнять 5-осевое вращательное движение, в то время как по умолчанию станок использует 3-осевую планарную траекторию движения инструмента. Пользователь может отправлять списки инструментов и программы обработки с персонального компьютера непосредственно на контроллер и вручную вводить и удерживать программу. Данные датчиков, положение инструмента и параметры станка можно считывать с помощью программного обеспечения. Интегрированное программное обеспечение САМ-систем, обеспечивающее двустороннюю связь в сочетании с 3D-сканированием, позволило бы реализовать наиболее контролируемую и безопасную стратегию выращивания. Однако по мере того, как системы аддитивного производства становятся более воспроизводимыми и надежными, потребность в детальной проверке размеров наплавляемого материала будет уменьшаться.

### **Выводы по главе 1**

1. Технология прямого лазерного выращивания является разновидностью процесса прямого подвода энергии и материала. В данной технологии используется сфокусированный лазерный пучок в качестве теплового источника подводимой энергии. В зону выращивания – ванну расплава – поступает порошковый материал, где он расплавляется и затем сплавляется с подложкой или предыдущим слоем.

2. Для выращивания заготовок деталей существуют установки, выполненные по 5-осевой и 8-осевой компоновкам. Последние более предпочтительны, поскольку позволяют изготавливать крупногабаритные изделия и, в теории, не ограничены по габаритам рабочей зоны.

3. Обзор современного состояния САМ-систем применительно к технологии прямого лазерного выращивания показал недостаточную проработанность ПО и готовность к созданию полностью законченных управляющих программ для аддитивного производства.

4. Выполнен анализ проблемы получения крупногабаритных осесимметричных заготовок корпусных деталей ГТД с учётом назначения рационального припуска. Традиционной технологией получения крупногабаритных осесимметричных заготовок корпусных деталей ГТД является сборка раскатных колец, процесс получения которых сопровождается высокой трудоёмкостью и большим расходом материала ввиду большого количества напусков. Технология ПЛВ позволяет снизить трудоёмкость изготовления крупногабаритных осесимметричных заготовок корпусных деталей ГТД и повысить коэффициент использования материала за счёт снижения величины припуска и возможности получения формы заготовки, приближенной к форме детали. Установлено, что при замене традиционной технологии на технологию ПЛВ экономия материала возрастает в 1,2-3 раза.

## **ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИЙ МНОГООСЕВОЙ НАПЛАВКИ ПО ТЕХНОЛОГИИ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ ДЛЯ РОБОТИЗИРОВАННЫХ УСТАНОВОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДВУХОСЕВОГО ПОЗИЦИОНЕРА**

### **2.1 Формулировка кинематических ограничений для системы управления роботом и позиционером**

При управлении робототехническими комплексами возникает проблема планирования траекторий в определенном конфигурационном пространстве [70-72]. Цель данного планирования – обеспечить исполняющему органу такой набор положений, при которых возможно движение из начальной точки в конечную по заранее заданному закону движения без коллизий.

Конфигурационное пространство – это множество возможных конфигураций или положений робота. Данное пространство является областью досягаемости манипулятора и всегда приводится в соответствующей документации к промышленным роботам. Оно может быть статичным и динамически изменяющимся [73, 74]. В первом случае в области движения робота не возникает новых препятствий и не требуется переопределение пространства. При динамически изменяющемся пространстве необходимо учитывать движение тел, входящих в его область. Также следует отслеживать состояние обрабатываемого тела, что особенно важно при аддитивном производстве, поскольку выращиваемое изделие в ряде случаев может спровоцировать столкновение с узлами робота или рабочим инструментом, а также в значительной степени ограничить область, в которой должна производиться обработка.

В планировании движений используется понятие рабочего пространства, которое является совокупностью точек, которые как

принадлежат самому манипулятору, так и находятся в области его досягаемости, включая препятствия [75-77].

## 2.2 Постановка задачи совместного управления роботом и позиционером

Задача совместного управления шестиосевым роботом-манипулятором и двухосевым позиционером для заготовок деталей близких к осесимметричным состоит в формировании адаптивных траекторий при выращивании элементов заготовок деталей близких по форме к осесимметричным. Такая стратегия имеет определенные преимущества, например:

- снижается кинематическая неопределенность при использовании 8-осевой кинематической схемы, что повышает стабильность ориентации инструмента и упрощает процесс симуляции траекторий;
- минимизируется количество подвижных элементов при движении от точки к точке, что снижает риск коллизий компонентов установки [78].

Основная идея модели состоит в том, что движение по траектории из начального положения РТИ  $X_0$  в конечное положение  $X_1$  раскладывается на две составляющие: прямолинейное движение из  $X_0$  в промежуточное положение  $X_{01}$  за счёт движения робота и движение по дуге окружности из  $X_1$  в  $X_{01}$  за счёт поворота позиционера на угол  $C$  (рисунок 2.1).

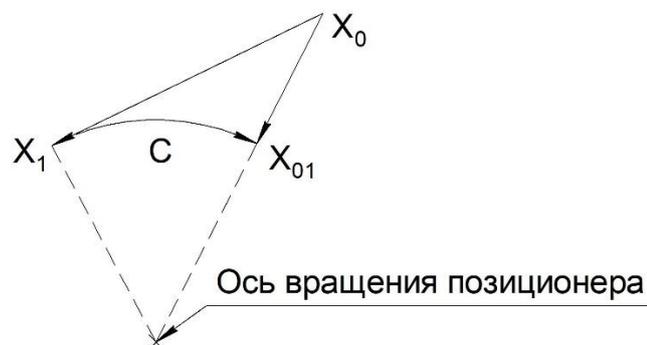


Рисунок 2.1 – Схема движения с учётом предлагаемого алгоритма

Переход из системы координат заготовки в систему координат позиционера, которая задана координатами  $x_0, y_0, z_0, W_0, P_0, R_0$ , определяется зависимостью

$$X_0 = \begin{bmatrix} ux_0 & vx_0 & wx_0 & qx_0 \\ uy_0 & vy_0 & wy_0 & qy_0 \\ uz_0 & vz_0 & wz_0 & qz_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{P_0}c_{R_0} & s_{W_0}s_{P_0}c_{R_0} - c_{W_0}s_{R_0} & c_{W_0}s_{P_0}c_{R_0} - s_{W_0}s_{R_0} & x_0 \\ c_{P_0}s_{R_0} & s_{W_0}s_{P_0}s_{R_0} + c_{W_0}c_{R_0} & c_{W_0}s_{P_0}c_{R_0} - s_{W_0}c_{R_0} & y_0 \\ -s_{R_0} & s_{W_0}c_{P_0} & c_{W_0}c_{P_0} & z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.1)$$

где  $s_{W_0} = \sin W_0, c_{W_0} = \cos W_0$  и т.д.

Обратный переход к углам  $W_0, P_0, R_0$  определяется зависимостями:

$$\begin{aligned} W_0 &= \arctg(vx_0, wz_0); \\ P_0 &= \arctg(-uz_0, \sqrt{ux_0ux_0 + uy_0uy_0}), B \neq \pm\pi/2; \\ R_0 &= \arctg(uy_0, ux_0). \end{aligned} \quad (2.2)$$

Если  $P_0 = \pm\pi/2, R_0 = 0$ .

### 2.3 Разработка математической модели формирования траекторий многоосевой наплавки

Запишем систему позиционера в формате параметров Денавита-Хартенберга. Индексация в нотации Денавита-Хартенберга при переходе из системы координат заготовки СК<sub>З</sub> в систему координат позиционера СК<sub>П</sub> представлены на рисунке 2.2 и в таблице 2.1.

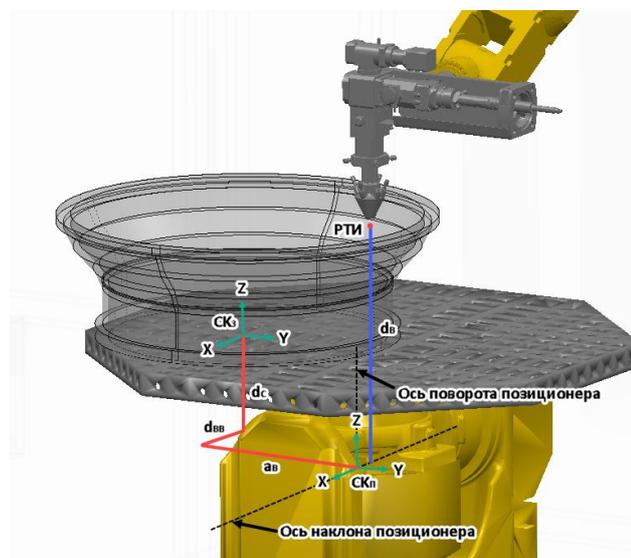


Рисунок 2.2 – Плечи для перехода в систему координат позиционера

Таблица 2.1 – Параметры Денавита-Хартенберга для перехода в систему координат позиционера

Параметр	№ звена		
	1	2	3
$\theta_i$	0	0	0
$d_i$ , мм	$d_B$	$d_{BB}$	$d_C$
$a_i$ , мм	$a_B$	0	0
$\alpha_i$ , град	90	-90	0

В этом случае введем замену:

$$a_B = x_0, d_{BB} = y_0, d_B - d_C = z_0,$$

где  $a_B$ ,  $d_{BB}$ ,  $d_B$  – расстояния между СК инструмента и нулевой точкой позиционера, измеренных вдоль осей  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  соответственно,  $d_C$  – расстояние между СК заготовки и осью наклона позиционера  $B$ .

Чтобы реализовать движение позиционера относительно инструмента, необходимо считать координаты точек относительно базы позиционера. Для перехода из системы координат инструмента в систему координат заготовки необходимо использовать обратную матрицу однородного преобразования  $T_{i-1}^i$ :

$$T_{i-1}^i = (T_i^{i-1})^{-1} = \begin{bmatrix} c\theta_i & s\theta_i & 0 & -a_i \\ -s\theta_i c\alpha_i & c\theta_i c\alpha_i & s\alpha_i & -d_i s\alpha_i \\ s\theta_i s\alpha_i & -c\theta_i s\alpha_i & c\alpha_i & -d_i c\alpha_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.3)$$

Представим точку  $X_1$  в матричной форме аналогично  $X_0$ :

$$X_1 = \begin{bmatrix} c_{P1}c_{R1} & s_{W1}s_{P1}c_{R1} - c_{W1}s_{R1} & c_{W1}s_{P1}c_{R1} - s_{W1}s_{R1} & x_1 \\ c_{P1}s_{R1} & s_W s_P s_R + c_{W1}c_{R1} & c_{W1}s_{P1}c_{R1} - s_{W1}c_{R1} & y_1 \\ -s_{R1} & s_{W1}c_{P1} & c_{W1}c_{P1} & z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.4)$$

где  $s_W = \sin W_1$ ,  $c_W = \cos W_1$  и т.д.

Пусть точка  $X_1$ , принадлежащая массиву точек выращиваемой заготовки и заданная в системе координат инструмента, переместится в точку  $(X_B)_1$  за счет наклона оси позиционера на угол  $B$ . В системе координат СК<sub>3</sub> координаты этой точки будут определяться преобразованием (обратная задача кинематики):

$$(X_B)_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -d_C \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} cB & sB & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & d_{BB} \\ -sB & cB & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} cB & sB & 0 & 0 \\ -sB & cB & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -a_B \\ 0 & 0 & 1 & -d_B \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot X_1. \quad (2.5)$$

При повороте позиционера на угол  $C$  точка  $X_B$  переместится в точку  $X_C$ , координаты которой в системе координат заготовки будут определяться зависимостью

$$(X_C)_1 = \begin{bmatrix} cC & -sC & 0 & 0 \\ sC & cC & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot (X_B)_1. \quad (2.6)$$

В системе координат инструмента координаты этой точки будут определяться преобразованием (прямая задача кинематики)

$$X_{01} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_B \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_B \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_{BB} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_C \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot (X_C)_1. \quad (2.7)$$

Соответственно, робот должен переместить инструмент из исходной точки  $X_0$  в точку  $X_{01}$ . Ниже представлен пошаговый алгоритм расчета координат точки  $X_{01}$  и углов наклона и поворота позиционера  $B$  и  $C$ .

1. Определяется угол  $B_1$  наклона оси позиционера в точке  $X_1$ .

Если рассматривать точку  $X_1$  в матричном виде  $X_1 = \{x_{ij}\}_1$ , то направляющие орты этой точки будут представлять собой элементы матрицы

$$i_1 = x_{13}, j_1 = x_{23}, k_1 = x_{33}, \quad (2.8)$$

откуда угол  $B_1$  определяется согласно формуле

$$B_1 = -\text{arctg}(\sqrt{i_1^2 + j_1^2}, k_1). \quad (2.9)$$

2. Переводятся координаты точки  $X_1$  в систему координат позиционера при повороте на угол  $B_1$  по зависимости (2.5).

3. Определяются возможные радиусы поворота позиционера относительно собственной оси  $Z$ :

$$R_1 = \sqrt{x_{14}^2 + x_{24}^2}, \quad (2.10)$$

где  $x_{14}$ ,  $x_{24}$  – элементы матрицы  $(X_B)_1$ . Аналогично вычисляется радиус поворота  $R_0$  для точки  $X_0$ .

4. Вычисляется возможный угол поворота позиционера.

Возможны три случая определения угла поворота  $C_1$ :

- если  $i_1 \geq 0$  и  $j_1 \geq 0$ , то точка  $X_1$  находится в 1 и 4 квадрантах системы координат позиционера

$$C_1 = \text{arctg}\left(\frac{j_1}{i_1}\right) + \pi;$$

- если  $i_1 < 0$  и  $j_1 \geq 0$ , то квадрант 2

$$C_1 = \text{arctg}\left(\frac{j_1}{i_1}\right) + 2\pi;$$

- если  $i_1 < 0$  и  $j_1 < 0$ , то квадрант 3

$$C_1 = \text{arctg}\left(\frac{j_1}{i_1}\right).$$

5. Определяется возможность поворота позиционера на угол  $C$

Для этой цели рассматриваются погрешности, связанные с возможным поворотом позиционера. Первая погрешность относится к замене линейной интерполяции объединенной круговой и линейной. Рисунок 2.3 наглядно иллюстрирует такой подход. Требуемое движение по вектору 1 можно разложить на элементарные перемещения по векторам 2 и 3, где вектор 2 направлен вдоль хорды дуги 4, образованной при относительном повороте позиционера на угол  $\delta_C$ . Если применить совместное движение позиционера и

робота, т.е. заменить вектор 2 дугой 4, то такая замена приведет к появлению максимальной погрешности  $\delta_0$  (рисунок 2.3).

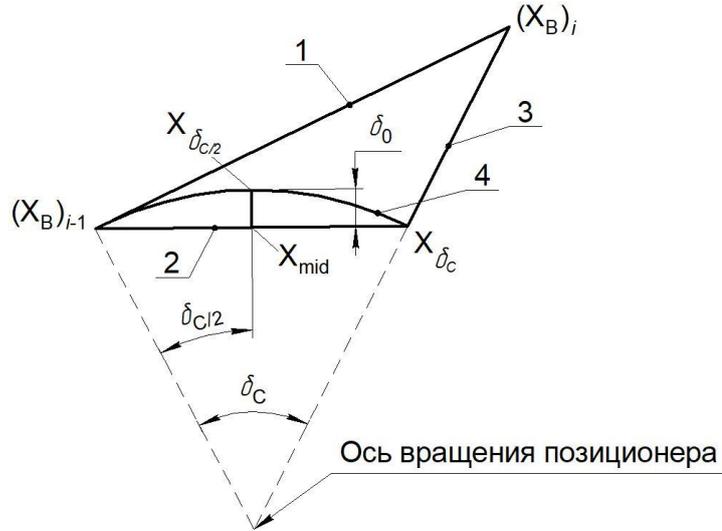


Рисунок 2.3 – Иллюстрация появления погрешности

Обозначим через индексы  $i-1$  и  $i$  последовательные точки траектории, куда должен переместиться инструмент. Их координаты в нотации (2.1) в системе координат заготовки при его наклоне на угол  $B$  обозначим соответственно  $(X_B)_{i-1}$  и  $(X_B)_i$ .

Разница в угловом положении позиционера определяется зависимостью

$$\delta_C = C_i - C_{i-1}, \quad (2.11)$$

где  $C_i$  – угол поворота позиционера в точке  $i$ ,  $C_{i-1}$  – угол поворота позиционера в точке  $i-1$ .

Введем обозначения координат и угловых трансформаций:

$$\{x_{jk}\} = (X_B)_{i-1};$$

$$\{t_{kj}\}_{\delta_C} = \begin{bmatrix} c\delta_C & -s\delta_C & 0 & 0 \\ s\delta_C & c\delta_C & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (2.12)$$

$$\{t_{kj}\}_{\delta_{C/2}} = \begin{bmatrix} c\delta_{C/2} & -s\delta_{C/2} & 0 & 0 \\ s\delta_{C/2} & c\delta_{C/2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Декартовы координаты ключевых точек в этом случае можно рассчитать через соответствующие матрицы:

$$\begin{aligned} X_{\delta_c} &= \{t_{kj}\}_{\delta_c} \cdot \{x_{j4}\}, \quad j, k = 1 \dots 3; \\ X_{\delta_{c/2}} &= \{t_{kj}\}_{\delta_{c/2}} \cdot \{x_{j4}\}, \quad j, k = 1 \dots 3; \\ X_{mid} &= (\{x_{j4}\} + \{x_{j4}\}_{\delta_c}) / 2, \quad j = 1 \dots 3. \end{aligned} \quad (2.13)$$

Тогда погрешность отклонения от линейной интерполяции будет рассчитываться по зависимости

$$\delta_0 = \sqrt{(X_{\delta_{c/2}} - X_{mid})^T (X_{\delta_{c/2}} - X_{mid})}. \quad (2.14)$$

Условие непревышения погрешности при замене линейной интерполяции на круговую можно записать в виде

$$\delta_0 \leq (\delta_0)_{допустимое}. \quad (2.15)$$

Следующая погрешность в дополнение к рассмотренной ранее также ограничивает возможность замены линейной интерполяции на сумму круговой и линейной. Для этого вычисляется относительная погрешность приращения радиусов возможного поворота и сравнивается с заданной точностью:

$$\delta_1 = \left| 1 - \frac{R_{i-1}}{R_i} \right| \leq (\delta_1)_{допустимое}. \quad (2.16)$$

Еще одним ограничением, которое возникает при использовании замены линейного движения на круговое, является кинематическое ограничение поворотной оси позиционера. Оно заключается в невозможности обеспечения требуемой скорости наплавки в точках, близких к оси вращения позиционера. Критический радиус, при котором позиционер может обеспечить заданную скорость, определяется по формуле

$$R_{крит} = \frac{v_p}{\omega_{п}}, \quad (2.17)$$

где  $v_p$  – рабочая скорость, мм/с,  $\omega_{п}$  – максимальная угловая скорость поворотной оси позиционера, град/с.

При выращивании металлических изделий рабочая скорость, при которой осуществляется осаждение металлопорошковой композиции на подложку и заготовку составляет от 20 до 30 мм/с. Максимальная угловая скорость для поворотной оси позиционера FANUC 2-Axis Servo Positioner составляет  $190^\circ \text{ c}^{-1}$ . Соответственно, согласно формуле 2.17,  $R_{\text{крит}} = 0,15 \text{ мм}$  (при скорости 20 мм/с), однако, исходя из практического применения, длительная работа с такими высокими скоростями вращения позиционера приводит к быстрому нагреву электродвигателей и повышенному износу механизмов позиционера. В добавок к этому, при выращивании массивных крупногабаритных заготовок, высокие скорости вращения позиционера снижают точность позиционирования и, следовательно, качество наплавленного валика на начальной и конечной зонах. Также, слишком близкое расположение точки к оси вращения может привести к сингулярности позиционера, что может быть причиной перекрута наплавочного инструмента и обрыва энергоцепи. Поэтому принимается, что  $R_{\text{крит}} = 10 \text{ мм}$ , а все точки синтезируемой заготовки, лежащие внутри окружности с радиусом  $R_{\text{крит}}$ , обрабатываются только за счет движения робота.

В результате, если условие

$$(\delta_0 \leq (\delta_0)_{\text{допустимое}}) \wedge (\delta_1 \leq (\delta_1)_{\text{допустимое}}) \wedge (R_i \geq R_{\text{крит}}) = 1, \quad (2.18)$$

выполняется, то поворот позиционера на угол  $C$  становится возможным.

6. Если поворот позиционера возможен, то после поворота позиционера координаты инструмента  $(X_C)_1$  в системе координат заготовки СК<sub>3</sub> рассчитываются по зависимости (2.6).

7. Производится пересчет координат инструмента  $X_C$  из СК<sub>3</sub> в систему координат инструмента СК<sub>И</sub> по зависимости (2.7).

8. Полученные координаты  $X_{01}$  вместе с углами  $B$  и  $C$  выводятся в выходной файл.

## 2.4 Численные эксперименты

Для тестирования разработанного алгоритма необходимо проверить его функционирование в типовых случаях применения, а также в критических местах. В типовых случаях следует рассмотреть:

- 1) круговую траекторию, концентричную с осью вращения позиционера при угле наклона  $B = 0$ ;
- 2) линейную траекторию под разными углами, в том числе касательные к оси вращения позиционера при угле наклона  $B = 0$ ;
- 3) круговую траекторию, концентричную с осью вращения позиционера при угле наклона  $B = 70^\circ$ ;
- 4) линейную траекторию под разными углами, в том числе касательные к оси вращения позиционера при угле наклона  $B = 70^\circ$ ;
- 5) круговую траекторию, концентричную с осью вращения позиционера при изменяющемся угле наклона  $B$  от 0 до  $30^\circ$ .

Под критическими местами следует понимать ограничения, которые были поставлены в формуле (2.18). В этом случае следует проверить работу алгоритма при значениях  $\delta_0$ ,  $\delta_1$  и  $R_i$  в окрестностях значений  $(\delta_0)_{\text{допустимое}}$ ,  $(\delta_1)_{\text{допустимое}}$  и  $R_{\text{крит}}$  соответственно.

Круговая траектория, концентричная с осью вращения позиционера при угле наклона  $B = 0$ . В этом случае все точки, принадлежащие траектории рабочего хода, лежат на окружности с радиусом  $R = 100$ . Сначала симулируется обработка при движении только робота, откуда берутся координаты каждой рабочей точки управляющей программы. Затем применяется разработанный алгоритм, который пересчитывает координаты точек и добавляет углы наклона и поворота позиционера. Аналогично проверяются остальные случаи. В таблице 2.2 приведен фрагмент управляющей программы для пятого типового случая для компоновок «робот» и «робот + позиционер» при угле наклона позиционера  $B = 20^\circ$ .

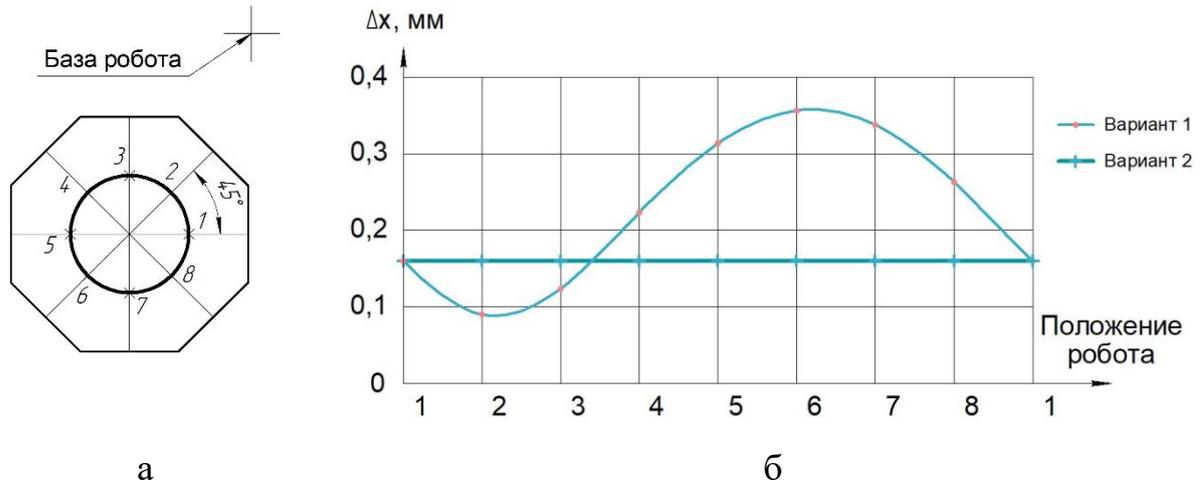
Таблица 2.2 – Фрагменты УП для пятого случая

№ точки	Исходные координаты	Пересчитанные координаты
1	X = 100.358 mm, Y = -4.530 mm, Z = 0.003 mm, W = 19.953 deg, P = 0.956 deg, R = -89.576 deg J1 = -20.000 deg, J2 = -90.000 deg	X = 100.358 mm, Y = -4.530 mm, Z = 0.003 mm, W = 19.975 deg, P = 0.000 deg, R = 267.416 deg J1 = -19.975 deg, J2 = 267.416 deg
2	X = 99.804 mm, Y = 5.455 mm, Z = 0.003 mm, W = 19.698 deg, P = 3.380 deg, R = -96.297 deg J1 = -20.000 deg, J2 = -90.000 deg	X = 99.804 mm, Y = 5.455 mm, Z = 0.003 mm, W = 19.975 deg, P = 0.000 deg, R = 273.129 deg J1 = -19.975 deg, J2 = 273.129 deg
3	X = 99.626 mm, Y = 8.660 mm, Z = 0.003 mm, W = 19.368 deg, P = 5.090 deg, R = -98.056 deg J1 = -20.000 deg, J2 = -90.000 deg	X = 99.626 mm, Y = 8.660 mm, Z = 0.003 mm, W = 20.001 deg, P = 0.000 deg, R = 274.968 deg J1 = -20.001 deg, J2 = 274.968 deg
4	X = 99.012 mm, Y = 14.024 mm, Z = 0.003 mm, W = 18.829 deg, P = 6.873 deg, R = -100.186 deg J1 = -20.000 deg, J2 = -90.000 deg	X = 99.012 mm, Y = 14.024 mm, Z = 0.003 mm, W = 20.001 deg, P = 0.000 deg, R = 278.062 deg J1 = -20.001 deg, J2 = 278.062 deg
5	X = 98.131 mm, Y = 19.245 mm, Z = 0.003 mm, W = 18.215 deg, P = 8.399 deg, R = -101.765 deg J1 = -20.000 deg, J2 = -90.000 deg	X = 98.131 mm, Y = 19.245 mm, Z = 0.003 mm, W = 19.998 deg, P = 0.000 deg, R = 281.096 deg J1 = -19.998 deg, J2 = 281.096 deg

Таким образом, во второй главе разработана математическая модель формирования траекторий многоосевой наплавки, в которой реализуется адаптивная модификация управляющей программы, в соответствии с которой для каждой пары точек траектории наплавочного инструмента роботизированной установки определяется возможность изменения исходной траектории в сторону уменьшения перемещений за счёт поворота позиционера без изменения заданной траектории наплавки в пределах, определяемых ограничениями (7) и (8).

Этот принцип иллюстрирует движение по овалу с диаметром большой оси 500 мм и овальностью 5% с центром, совпадающим с поворотной осью позиционера (рисунок 2.4а). В первом случае движение осуществлялось за счёт робота, а во втором случае за счёт позиционера и робота, с применением разработанной модели. На рисунке 2.4б показан график кинематической погрешности робота  $\Delta x$  в зависимости от его положения для двух вариантов движения, откуда видно, что в первом варианте из-за изменения вылета робота кинематическая погрешность робота принимает максимальное значение 0,36 мм, в то время как второй вариант принимает значение около 0,16 мм,

поскольку движение осуществляется за счёт позиционера и небольших перемещений робота.



а – схема движения, б – график кинематической погрешности робота в зависимости от его положения

Рисунок 2.4 – Определение кинематической погрешности

На рисунке 2.5 показан график кинематической погрешности робота  $\Delta x$  в зависимости от диаметра овала  $D$  для двух вариантов движения. Из графика следует, что эффективность разработанной модели повышается при выращивании наиболее удалённых от оси позиционера элементов заготовок деталей. В этом случае точность позиционирования возросла на 70% и составила 0,14 мм.

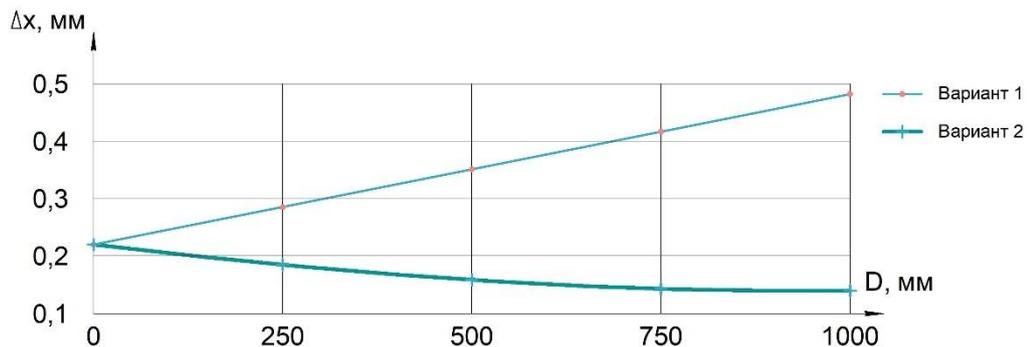


Рисунок 2.5 – Кинематическая погрешность в зависимости от диаметра траектории

## Выводы по главе 2

1. Разработана математическая модель для управления 6-и осевым роботом-манипулятором РУПЛВ и 2-х осевым позиционером для заготовок деталей близких к осесимметричным. Она позволяет распределить движение между роботом и позиционером. В этом случае движение от точки  $X_0(x_0, y_0, z_0, W_0, P_0, R_0)$  в точку  $X_1(x_1, y_1, z_1, W_1, P_1, R_1)$  производится одновременно по двум траекториям: прямолинейное движение от  $X_0$  в точку  $X_{01}$  за счет движения робота и движение по дуге окружности от  $X_1$  в точку  $X_{01}$  за счет поворота позиционера на угол  $C$ .

2. Математическая модель учитывает как точность интерполяции траектории, так и возможность поворота позиционера, в зависимости от радиального расположения точек траектории. Также, если точки траектории располагаются ближе, чем 10 мм от оси вращения позиционера, то движение осуществляется только роботом.

3. Разработана математическая модель формирования траекторий многоосевой наплавки для формообразования заготовок деталей ГТД по технологии прямого лазерного выращивание на роботизированных установках с использованием двухосевого позиционера, позволяющая распределить движение между роботом и позиционером. Модель формирования адаптированных траекторий при выращивании элементов, близких по форме к осесимметричным учитывает как точность интерполяции траектории, так и возможность поворота позиционера, в зависимости от радиального расположения точек траектории. Проведённые эксперименты показали, что точность позиционирования при использовании модели составляет 0,14 мм, что на 70% точнее исходного способа позиционирования.

# ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА СРЕДСТВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ ПРОГРАММ ДЛЯ РОБОТИЗИРОВАННЫХ УСТАНОВОК ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ

## 3.1 Формализация общей задачи управления роботом в нотации DH- параметров

Общая задача управления роботом состоит в определении его конфигурации, позволяющей достичь заданное положение по заданной траектории [79]. Выделяют 3 вида управления роботом:

1) **Позиционное управление.** В этом случае нулевая точка инструмента движется по произвольной траектории от начальной к конечной точке. При управлении промышленными роботами такой тип движения называется шарнирным перемещением. Шарнирное перемещение – простейший режим перемещения робота в заданное положение. Робот движется с ускорением одновременно вдоль всех или вокруг всех осей, перемещается с заданной скоростью подачи, замедляется и останавливается одновременно по всем осям. Траектория перемещения обычно нелинейна. Ориентация инструмента во время перемещения не контролируется (рисунок 3.1).

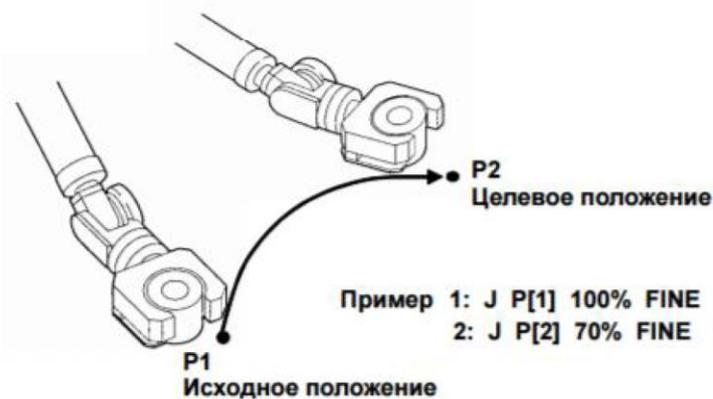
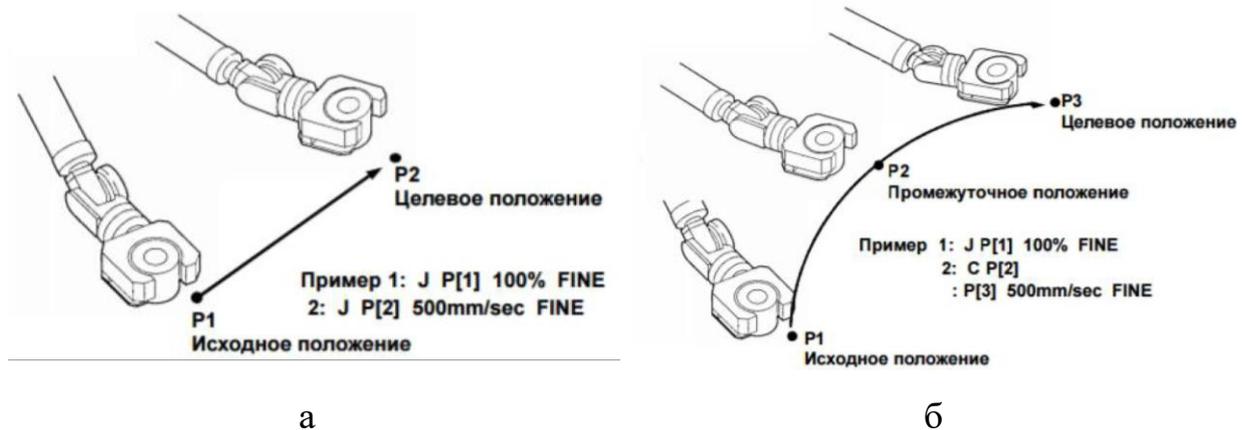


Рисунок 3.1 – Пример шарнирного перемещения

2) Контурное управление. При контурном управлении траектория определяется большим числом точек, через которые нулевая точка инструмента движется по некоторой гладкой кривой.

3) Контурное управление с интерполяцией. В этом случае перемещение между начальной и конечной точками задается по определенному закону движения – линейному, по дуге окружности и т.д. (рисунок 3.2).



а – линейная интерполяция, б – круговая интерполяция

Рисунок 3.2 – Контурное управление с интерполяцией

Связь между звеньями робота и рабочим пространством робота осуществляется с помощью геометрической модели. Наиболее широко используемой нотацией является Денавита-Хартенберга [80], и обычно она предоставляется производителями роботов в виде спецификаций роботов.

Параметры Денавита-Хартенберга позволяют определить тело в пространстве при помощи четырех значений:

- 1)  $\theta_i$  – угол от  $x_{i-1}$  до  $x_i$ , измеренный вокруг оси  $z_{i-1}$ ;
- 2)  $d_i$  – расстояние между  $x_{i-1}$  и  $x_i$ , измеренное вдоль оси  $z_{i-1}$ ;
- 3)  $a_i$  – расстояние между  $z_{i-1}$  и  $z_i$ , измеренное вдоль оси  $x_i$ ;
- 4)  $\alpha_i$  – угол от  $z_{i-1}$  до  $z_i$ , измеренный вокруг оси  $x_i$ .

Привязка система координат для каждого  $i$ -го звена робота начинается с определения оси  $z_i$ , которая должна совпадать с осью вращения  $i+1$ -го звена. Затем выбирается ось  $x_i$  так, чтобы она была перпендикулярна оси  $z_{i-1}$  и

пересекала ее. Направление оси  $x_0$  выбирается так, чтобы она была сонаправлена оси  $x_1$ . Начало системы координат лежит в точке пересечения осей  $x_i$  и  $z_i$ . Направление осей  $y_i$  выбирается так, чтобы выполнялось векторное произведение:

$$\vec{y}_i = \vec{z}_i \times \vec{x}_i.$$

На рисунке 3.3 представлены схема расположения систем координат звеньев манипулятора и обозначение параметров Денавита-Хартенберга.

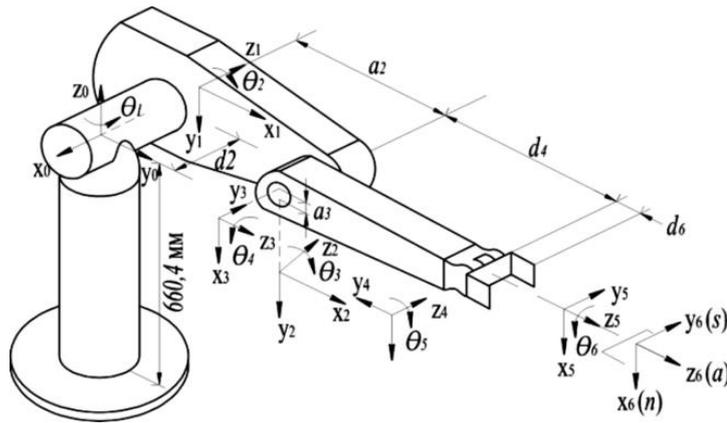


Рисунок 3.3 – Системы координат звеньев

Для робота Fanuc M-20iB/25 параметры Денавита-Хартенберга можно определить из технической документации на робот-манипулятор (рисунок 3.4).

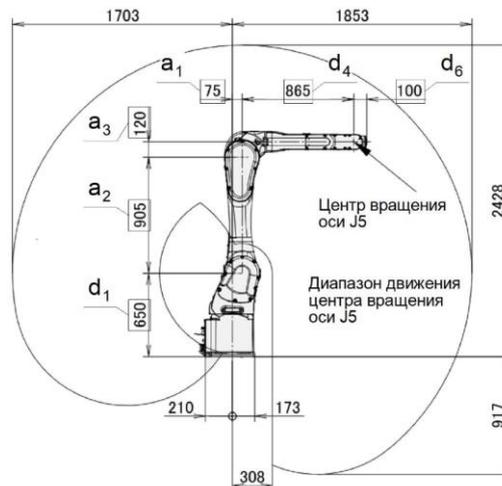


Рисунок 3.4 – Значения параметров Денавита-Хартенберга для робота Fanuc M-20iB/25

Определить положение звеньев робота в пространстве можно с помощью обобщенных координат  $q_i$ . При этом, если звено вращательное, то величина  $q_i = \theta_i$ , а является  $d_i$  константой, а если поступательное, то величина  $q_i = d_i$ , а является  $\theta_i$  константой. Поскольку в промышленном роботоманипуляторе все звенья являются вращательными, то из 24 геометрических параметров робота только 6 являются переменными. Параметры Денавита-Хартенберга для шестиосевого робота удобно представить в табличном виде (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Параметры Денавита-Хартенберга для Fanuc M-20iB/25

Параметр	№ звена					
	1	2	3	4	5	6
$\theta_i$	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_2 + \theta_3$	$\theta_4$	$\theta_5$	$\theta_6$
$d_i$ , мм	650	0	0	865	0	100
$a_i$ , мм	75	905	120	0	0	0
$\alpha_i$ , град	90	0	90	-90	90	0

При управлении манипуляторами решаются прямая и обратная задача кинематики. При решении прямой задачи кинематики из текущих значений обобщенных координат, в данном случае – углов поворота звеньев, определяется текущее положение рабочей точки инструмента. Для решения обратной задачи кинематики из значений координат РТИ определяются углы поворота звеньев. Обратная задача кинематики решается в общем случае для учета динамических сил, сил трения и т.п. на реальное положение рабочей точки инструмента.

### 3.1.1 Решение прямой задачи кинематики

Для определения связи между началом координат робота и началом координат фланца используется матрица однородного преобразования:

$$\begin{bmatrix} x^0 \\ y^0 \\ z^0 \\ 1 \end{bmatrix} = T_6^0 \begin{bmatrix} x^6 \\ y^6 \\ z^6 \\ 1 \end{bmatrix},$$

где  $\begin{bmatrix} x^0 \\ y^0 \\ z^0 \\ 1 \end{bmatrix}$  – координаты абсолютной системы координат (база робота),

$T_6^0$  – матрица однородного преобразования,

$\begin{bmatrix} x^6 \\ y^6 \\ z^6 \\ 1 \end{bmatrix}$  – координаты фланца робота.

В свою очередь, матрица однородного преобразования  $T_6^0$  представляет собой произведения матриц однородного преобразования между текущим и предыдущим звеньями и имеет вид:

$$T_6^0 = T_1^0 T_2^1 T_3^2 T_4^3 T_5^4 T_6^5.$$

В общем виде матрица однородного преобразования  $T_i^{i-1}$  представляет собой произведение двух матриц поворота (матрица  $R(\theta_i)$  для поворота вокруг оси  $z_{i-1}$  и матрица  $R(\alpha_i)$  для поворота вокруг  $x_i$ ) и двух матриц линейного переноса (матрица  $P(a_i)$  для переноса вдоль оси  $x_i$  и матрица  $P(d_i)$  для переноса вдоль оси  $z_{i-1}$ ):

$$\begin{aligned}
T_i^{i-1} &= R(\theta_i)P(d_i)P(\alpha_i)R(\alpha_i) = \\
&= \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & 0 \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i & 0 \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \\
&= \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \sin \theta_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.
\end{aligned}$$

Подставляя значения параметров Денавита-Хартенберга из таблицы 3.1, получаем:

$$T_1^0 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & \sin \theta_1 & 75 \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 & 0 & -\cos \theta_1 & 75 \sin \theta_1 \\ 0 & 1 & 0 & 650 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$T_2^1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & 905 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & 905 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$T_3^2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & 0 & \sin \theta_3 & 120 \cos \theta_3 \\ \sin \theta_3 & 0 & -\cos \theta_3 & 120 \sin \theta_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$T_4^3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & 0 & -\sin \theta_4 & 0 \\ \sin \theta_4 & 0 & \cos \theta_4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 865 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$T_5^4 = \begin{bmatrix} \cos \theta_5 & 0 & \sin \theta_5 & 0 \\ \sin \theta_5 & 0 & -\cos \theta_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$T_6^5 = \begin{bmatrix} \cos \theta_6 & -\sin \theta_6 & 0 & 0 \\ \sin \theta_6 & \cos \theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 100 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Умножив  $T_6^0$  на матрицу преобразования для инструмента, получим матрицу преобразования, отражающую связь системы координат робота с положением инструмента. Матрица преобразования для инструмента имеет следующий вид:

$$T_{EE}^6 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 290 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 90 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Окончательная матрица преобразования, будет иметь вид:

$$\begin{bmatrix} x^0 \\ y^0 \\ z^0 \\ 1 \end{bmatrix} = T_6^0 \cdot T_{EE}^6 \begin{bmatrix} x^6 \\ y^6 \\ z^6 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Таким образом, подстановка значений  $\theta_i$  в матрицу преобразования будет давать положение и ориентацию рабочей точки инструмента относительно мировой системы координат, что и будет решением прямой задачи кинематики.

### 3.1.2 Решение обратной задачи кинематики

Обратная задача кинематики состоит в том, чтобы из значений координат и ориентации рабочей точки инструмента  $(x, y, z, i, j, k)$ , получить значения углов поворота звеньев  $\theta_i$ . Существует множество разных способов решения ОЗК, например, с помощью бикватернионов [81, 82], алгоритма Диксона [83] и нейронных сетей [84], однако они содержат громоздкие вычисления, требуют больших вычислительных мощностей и имеют

погрешности решения [85]. Более точный и быстрый метод решения обратной задачи является аналитический, позволяющий из входных параметров, заданных в декартовых координатах, получить точные значения обобщенных координат.

В общем случае обобщенная координата является функцией, зависящей только от входных параметров. Для классических роботов-манипуляторов в роли обобщенных координат выступают углы поворота звеньев. В этом случае для шестиосевого робота положение звеньев будет определяться как функция

$$\begin{cases} \theta_1 = \theta_1(x, y, z, i, j, k, \alpha_1, \theta_1, a_1, d_1, t), \\ \theta_2 = \theta_2(x, y, z, i, j, k, \alpha_2, \theta_2, a_2, d_2, t), \\ \theta_3 = \theta_3(x, y, z, i, j, k, \alpha_3, \theta_3, a_3, d_3, t), \\ \theta_4 = \theta_4(x, y, z, i, j, k, \alpha_4, \theta_4, a_4, d_4, t), \\ \theta_5 = \theta_5(x, y, z, i, j, k, \alpha_5, \theta_5, a_5, d_5, t), \\ \theta_6 = \theta_6(x, y, z, i, j, k, \alpha_6, \theta_6, a_6, d_6, t), \end{cases}$$

где  $x, y, z$  – декартовы координаты фланца робота относительно мировой СК,  $i, j, k$  – направляющие орты оси инструмента,  $\alpha_i, \theta_i, a_i, d_i$  – параметры звеньев,  $t$  – время [86].

Решение обратной задачи кинематики осуществляется с некоторыми изменениями, позволяющими существенно упростить расчеты. Так  $d_6$  приравняется к нулю и расчет идет для точки пересечения осей  $J_4, J_5, J_6$ . После этого в матрице преобразования инструмента вводится первоначальное значение  $d_6$ . Для большей универсальности решения ОЗК все дальнейшие расчеты будут проводиться без подстановки значений ДН-параметров. Также, поскольку оси  $J_2$  и  $J_3$  параллельны, то, согласно [87], можно использовать  $T_3^1 = T_2^1 \cdot T_3^2$ , где

$$T_3^1 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2 + \theta_3) & 0 & \sin(\theta_2 + \theta_3) & a_2 \cos \theta_2 + a_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) \\ \sin(\theta_2 + \theta_3) & 0 & -\cos(\theta_2 + \theta_3) & a_2 \sin \theta_2 + a_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) \\ 0 & 1 & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Для обратного преобразования матриц необходимо вычислить промежуточные матрицы. Примем, что  $\cos \theta_i = c_i$ ,  $\sin \theta_i = s_i$ .

$$U_6 = T_6^5 = \begin{bmatrix} c_6 & -s_6 & 0 & 0 \\ s_6 & c_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$U_5 = T_5^4 \cdot U_6 = \begin{bmatrix} c_5 c_6 & -c_5 s_6 & s_5 & 0 \\ s_5 c_6 & -s_5 s_6 & -c_5 & 0 \\ s_6 & c_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Для снижения громоздкости матриц будем использовать локальные переменные  $U_{ijk}$ , где  $i$  – номер матрицы,  $j$  – номер ряда матрицы,  $k$  – номер столбца матрицы.

$$U_4 = T_4^3 \cdot U_5 = \begin{bmatrix} c_4 U_{511} - s_4 s_6 & c_4 U_{512} - s_4 s_6 & c_4 s_5 & 0 \\ s_4 U_{511} + c_4 s_6 & s_4 U_{512} + c_4 s_6 & s_4 s_5 & 0 \\ -U_{521} & -U_{522} & c_5 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$U_3 = T_3^2 \cdot U_4 = \begin{bmatrix} c_3 U_{411} - s_3 U_{521} & c_3 U_{412} - s_3 U_{522} & c_3 U_{413} + s_3 c_5 & d_4 s_3 + a_3 c_3 \\ s_3 U_{411} + c_3 U_{521} & s_3 U_{412} + c_3 U_{522} & s_3 U_{413} - c_3 c_5 & -d_4 c_3 + a_3 s_3 \\ U_{421} & U_{422} & U_{423} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$U_2 = T_3^1 \cdot U_4 = \begin{bmatrix} c_{23} U_{411} - s_{23} U_{521} & c_{23} U_{412} - s_{23} U_{522} & c_{23} U_{413} + s_{23} c_5 & d_4 s_{23} + a_3 c_{23} + a_2 c_2 \\ s_{23} U_{411} + c_{23} U_{521} & s_{23} U_{412} + c_{23} U_{522} & s_{23} U_{413} - c_{23} c_5 & -d_4 c_{23} + a_3 s_{23} + a_2 s_{23} \\ U_{421} & U_{422} & U_{423} & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$U_1 = T_1^0 \cdot U_2 = \begin{bmatrix} c_1 U_{211} + s_1 U_{421} & c_1 U_{212} + s_1 U_{422} & c_1 U_{213} + s_1 U_{423} & c_1 U_{214} + d_2 s_1 + a_1 c_1 \\ s_1 U_{211} - c_1 U_{421} & s_1 U_{212} - c_1 U_{422} & s_1 U_{213} - c_1 U_{423} & s_1 U_{214} - d_2 s_1 + a_1 s_1 \\ U_{221} & U_{222} & U_{223} & U_{224} + d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Если рассматривать матрицу инструмента как

$$E_6 = \begin{bmatrix} u_x & v_x & w_x & q_x \\ u_y & v_y & w_y & q_y \\ u_z & v_z & w_z & q_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

то положение запястья робота  $p_x, p_y, p_z$  может быть выражено в виде

$$\begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_x - d_6 w_x \\ q_y - d_6 w_y \\ q_z - d_6 w_z \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Ориентацию запястья можно представить в виде

$$W_6 = \begin{bmatrix} u_x & v_x & w_x & p_x \\ u_y & v_y & w_y & p_y \\ u_z & v_z & w_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = U_1 \quad (3.1)$$

Переменные  $u_x, u_y, u_z, v_x, v_y, v_z, w_x, w_y, w_z$  представляют собой направляющие косинусы рабочего органа и осей запястья (определяющих его ориентацию), а  $p_x, p_y, p_z$  декартовы координаты запястья. Это и есть требуемые результаты полного прямого преобразования, учитывая все ДН-параметры 6 звеньев робота (за исключением расстояния  $d_6$ ).

Для упрощения определения углов поворота звеньев используются матрицы  $V_i$ , которые определяются из уравнений, представленных ниже.

$$\begin{aligned} W_6 &= V_0 = U_1, \\ (T_1^0)^{-1} \cdot W_6 &= V_1 = U_2, \\ (T_2^1)^{-1} \cdot V_1 &= V_2 = U_3, \\ (T_3^1)^{-1} \cdot V_1 &= V_3 = U_4, \\ (T_4^3)^{-1} \cdot V_3 &= V_4 = U_5, \\ (T_5^4)^{-1} \cdot V_4 &= V_5 = U_6. \end{aligned} \quad (3.2)$$

$V_0$  можно представить в общем виде:

$$V_{0j} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ M \end{bmatrix},$$

где  $V_{0jk}$  получены путем замены  $X, Y, Z, M$  компонентов  $k$ -го столбца матрицы  $E_6$  с  $M = 0$  для  $k = 1, 2, 3$  и  $M = 1$  для  $k = 4$ . Следуя этому представлению, получим:

$$V_{1j} = \begin{bmatrix} c_1 & s_1 & 0 & -a_1 \\ 0 & 0 & 1 & -c_1 \\ s_1 & -c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1X + s_1Y - a_1M \\ Z - d_1M \\ s_1X - c_1Y \\ M \end{bmatrix},$$

$$V_{2j} = \begin{bmatrix} c_2 & s_2 & 0 & -a_2 \\ -s_2 & c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{11} \\ V_{12} \\ V_{13} \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_2V_{11} + s_2V_{12} - a_2M \\ -s_2V_{11} + c_2V_{12} \\ V_{13} - d_2M \\ M \end{bmatrix},$$

$$V_{3j} = \begin{bmatrix} c_{23} & s_{23} & 0 & -(a_2c_3 + a_3) \\ 0 & 0 & -1 & -d_2 \\ s_{23} & -c_{23} & 1 & -a_2s_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{11} \\ V_{12} \\ V_{13} \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{23}V_{11} + s_{23}V_{12} - (a_2c_3 + a_3)M \\ V_{13} - d_2M \\ s_{23}V_{11} - c_{23}V_{12} - a_2s_3M \\ M \end{bmatrix},$$

$$V_{4j} = \begin{bmatrix} c_4 & s_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & d_4 \\ -s_4 & c_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{31} \\ V_{32} \\ V_{33} \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_4V_{31} + s_4V_{32} \\ -V_{33} + d_4M \\ -s_4V_{31} + c_4V_{32} \\ M \end{bmatrix},$$

$$V_{5j} = \begin{bmatrix} c_5 & s_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ s_5 & -c_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{41} \\ V_{42} \\ V_{43} \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_5V_{41} + s_5V_{42} \\ V_{43} \\ s_5V_{41} - c_5V_{42} \\ M \end{bmatrix}.$$

Используя (3.2), получим:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 U_{211} + s_1 U_{421} & c_1 U_{212} + s_1 U_{422} & c_1 U_{213} + s_1 U_{423} & c_1 U_{214} + d_2 s_1 + a_1 c_1 \\ s_1 U_{211} - c_1 U_{421} & s_1 U_{212} - c_1 U_{422} & s_1 U_{213} - c_1 U_{423} & s_1 U_{214} + d_2 c_1 + a_1 s_1 \\ U_{221} & U_{222} & U_{223} & U_{224} + d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Возвращаясь к (3.1), имеем:

$$\begin{cases} p_x = c_1 U_{214} + d_2 s_1 + a_1 c_1 \\ p_y = s_1 U_{214} + d_2 c_1 + a_1 s_1 \end{cases}.$$

Умножив первое уравнение на  $s_1$ , второе на  $c_1$  и вычитая второе из первого, получаем следующее уравнение:

$$s_1 p_x - c_1 p_y = d_2. \quad (3.3)$$

Если представить  $p_x = r \cos \varphi$ ,  $p_y = r \sin \varphi$ , где  $r > 0$ , то получим

$$\begin{cases} r = \sqrt{p_x^2 + p_y^2} \\ \varphi = \operatorname{arctg} \frac{p_y}{p_x} \end{cases}$$

Подставляя в (3.3), получаем

$$s_1 \cos \varphi - c_1 \sin \varphi = \frac{d_2}{r} = \sin(\theta_1 - \varphi),$$

откуда

$$\theta_1 = \begin{cases} \operatorname{arctg} \frac{p_y}{p_x} + \arcsin \frac{d_2}{r}, & p_y > 0, \\ \operatorname{arctg} \frac{p_y}{p_x} - \arcsin \frac{d_2}{r} + \pi, & p_y < 0. \end{cases}$$

Для нахождения угла  $\theta_2$  следует приравнять матрицы  $V_1$  и  $U_2$ .

$$\begin{bmatrix} V_{11} \\ V_{12} \\ V_{13} \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{23} U_{411} - s_{23} U_{521} & c_{23} U_{412} - s_{23} U_{522} & c_{23} U_{413} - s_{23} c_5 & d_4 s_{23} + a_3 c_{23} + a_2 c_2 \\ s_{23} U_{411} + c_{23} U_{521} & s_{23} U_{412} + c_{23} U_{522} & s_{23} U_{413} - c_{23} c_5 & -d_4 c_{23} + a_3 s_{23} + a_2 c_2 \\ U_{421} & U_{422} & U_{423} & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Приравняв элементы (1,4) и (2,4), возведя в квадрат и сложив, имеем

$$c_2 V_{114} + s_2 V_{124} = \frac{a_2^2 - d_4^2 - a_3^2 + V_{114}^2 + V_{124}^2}{2a_2} \quad (3.4)$$

Если представить  $V_{114} = r \cos \varphi$ ,  $V_{124} = r \sin \varphi$ , где  $r > 0$ , то получим

$$\begin{cases} r = \sqrt{V_{114}^2 + V_{124}^2} \\ \varphi = \operatorname{arctg} \frac{V_{124}}{V_{114}} \end{cases} \quad (3.5)$$

Подставив (3.5) в (3.4), получаем

$$\cos(\theta_2 - \varphi) = \frac{a_2^2 - d_4^2 - a_3^2 + V_{114}^2 + V_{124}^2}{2a_2 r} = k.$$

Если значение  $k > 1$ , то заданное положение находится вне досягаемости робота. Угол поворота второго звена будет определяться по формуле

$$\theta_2 = \operatorname{arctg} \frac{V_{124}}{V_{114}} \pm \arccos k.$$

Угол третьего звена  $\theta_3$  определяется путем приравнивания  $V_2$  к  $U_3$ :

$$\begin{bmatrix} V_{21} \\ V_{22} \\ V_{23} \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{311} & U_{312} & U_{313} & d_4 s_3 + a_3 c_3 \\ U_{321} & U_{322} & U_{323} & -d_4 c_3 + a_3 s_3 \\ U_{331} & U_{332} & U_{333} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Приравняв элементы (1,4) и (2,4), имеем

$$V_{214} = d_4 s_3 + a_3 c_3, \quad (3.6)$$

$$V_{224} = -d_4 c_3 + a_3 s_3.$$

Если представить  $d_4 = r \cos \varphi$ ,  $a_3 = r \sin \varphi$ , где  $r > 0$ , то получим

$$\begin{cases} r = \sqrt{a_3^2 + d_4^2} \\ \varphi = \operatorname{arctg} \frac{a_3}{d_4} \end{cases} \quad (3.7)$$

Подставляя (3.7) в (3.6), получаем

$$s_3 \cos \varphi + c_3 \sin \varphi = \sin(\varphi + \theta_3) = \frac{V_{214}}{r}$$

$$s_3 \sin \varphi - c_3 \cos \varphi = -\cos(\varphi + \theta_3) = \frac{V_{224}}{r},$$

Откуда

$$\theta_3 = \arctg \frac{V_{214}}{-V_{224}} - \arctg \frac{a_3}{d_4}.$$

Угол четвертого звена  $\theta_4$  определяется путем приравнивания  $V_3$  к  $U_4$ :

$$\begin{bmatrix} V_{31} \\ V_{32} \\ V_{33} \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{411} & U_{412} & c_4 s_5 & 0 \\ U_{421} & U_{422} & s_4 s_5 & 0 \\ U_{431} & U_{432} & c_5 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

$$\theta_4 = \arctg \frac{V_{323}}{V_{313}} = \arctg \frac{s_1 w_x - c_1 w_y}{c_{23} V_{113} + s_{23} w_z}.$$

Аналогично определяются углы  $\theta_5$  и  $\theta_6$ :

$$\theta_5 = \arctg \frac{s_5}{c_5} = \arctg \frac{c_4 V_{313} + s_4 V_{323}}{s_{23} V_{113} - c_{23} w_z},$$

$$\theta_6 = \arctg \frac{s_6}{c_6} = \arctg \frac{V_{431}}{c_5 V_{411} + s_5 V_{421}}.$$

Координаты рабочей точки инструмента  $p_x$ ,  $p_y$ ,  $p_z$  определяются из соотношения:

$$\begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_x - d_6 w_x \\ q_y - d_6 w_y \\ q_z - d_6 w_z \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Существует несколько способов описания ориентации рабочего органа: использование однородной матрицы  $E_6$ , определенной выше, или использование вращения вокруг выбранных осей.

Второй метод заключается в использовании углов крена, тангажа и рыскания, обозначаемых как  $\varphi_r$ ,  $\varphi_p$ ,  $\varphi_y$ , для вращений в положении концевых

рабочего органа  $q_x, q_y, q_z$  вокруг осей  $x, y, z$ , которые параллельны фиксированным базовым осям.

Зная  $\varphi_r, \varphi_p, \varphi_y$ , можно определить матрицу  $E_6$ , т.е. матрица, которая определяет положение и ориентацию рабочего органа в точках  $q_x, q_y, q_z$  как:

$$E_6 = \begin{bmatrix} u_x & v_x & w_x & q_x \\ u_y & v_y & w_y & q_y \\ u_z & v_z & w_z & q_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_p c_y & s_r s_p c_y - c_r s_y & c_r s_p c_y + s_r s_y & q_x \\ c_p s_y & s_r s_p s_y - c_r c_y & c_r s_p s_y - s_r c_y & q_y \\ -s_p & s_r c_p & c_r c_p & q_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где  $c_r = \cos \varphi_r, c_p = \cos \varphi_p, c_y = \cos \varphi_y, s_r = \sin \varphi_r, s_p = \sin \varphi_p, s_y = \sin \varphi_y$ .

Углы крена  $\varphi_r$ , тангажа  $\varphi_p$  и рыскания  $\varphi_y$  также можно определить по заданной матрице  $E_6$  следующим образом, для  $\varphi_p$ , не равного  $\pm 90$  градусов:

$$\varphi_r = \operatorname{arctg}(u_z, w_z),$$

$$\varphi_p = \operatorname{arctg}\left(-u_z, \sqrt{u_x^2 + u_y^2}\right),$$

$$\varphi_y = \operatorname{arctg}(u_y, u_x).$$

При  $\varphi_p = 90^\circ$

$$\varphi_r = \operatorname{arctg}(u_z, w_z),$$

$$\varphi_p = \frac{\pi}{2},$$

$$\varphi_y = 0.$$

При  $\varphi_p = -90^\circ$

$$\varphi_r = -\operatorname{arctg}(u_z, w_z),$$

$$\varphi_p = -\frac{\pi}{2},$$

$$\varphi_y = 0.$$

### 3.2 Разработка общей концепции конвертора представления траектории инструмента для решения обратной задачи связки робот-позиционер

Вопрос о совместной работе робота и позиционера состоит из двух основных задач:

1. Решение обратной кинематической задачи по заданным координатам и ориентации технологического инструмента для определения углов поворота звеньев;
2. Оптимизационная задача, распределяющая движение между роботом и позиционером.

Первая задача заключается в трансформации данных, получаемых при генерации файла CLData, алгоритм задачи следующий:

1. Из файла CLData берется информация о положении текущей  $X_0(x_0, y_0, z_0, W_0, P_0, R_0)$  и следующей  $X_1(x_1, y_1, z_1, W_1, P_1, R_1)$  точек траектории движения инструмента.
2. Решается обратная задача кинематики и определяются углы поворота звеньев робота ( $q_1, \dots, q_6$ ) и позиционера ( $q_7, q_8$ ). Для решения ОЗК требуются положение точки траектории движения инструмента и известные параметры Денавита-Хартенберга (рисунок 3.5).



Рисунок 3.5 – Схема взаимосвязи координат и ориентации точки и углов поворота звеньев

В данном случае углы поворота  $\theta_i$  являются обобщенными координатами, которые требуется вычислить, решив обратную задачу кинематики.

Вторая задача – оптимизационная – заключается в присвоении повышенного приоритета движения для позиционера, что позволяет обеспечивать выращивание осесимметричной траектории за счет использования всего одной оси. Алгоритм решения этой задачи был подробно рассмотрен во второй главе. Однако несмотря на то, что ОЗК для робота не решалась, при дальнейшей подготовке УП полезно знать углы поворота звеньев роботизированной ячейки. Это позволяет, во-первых, быстро провести симуляцию в верификаторах, не привязываясь к маркам роботов, УЧПУ которых не всегда имеются в верификаторе, а во-вторых, унифицировать управляющие программы и представлять их в едином виде, опять же не привязываясь к типам роботов.

### 3.3 Разработка решателя обратной задачи с использованием Open Source библиотек

Решение прямой и обратной задач производится с помощью приложения на основе программного обеспечения для управления роботами с открытым кодом OROCOS с использованием библиотеки кинематики и динамики робота KDL. Принципиальная схема работы ПО показана на рисунке 3.6.



Рисунок 3.6 – Принципиальная схема работы ПО

Приложение позволяет решить прямую и обратную задачу управления роботом. Прямой задачей является определение на основе углов разворота

промежуточных звеньев положения и ориентации завершающего звена робота. Обратной задачей является определение необходимых углов разворота промежуточных звеньев для получения требуемого положения завершающего звена.

Для работы приложения необходимо при запуске передать параметры работы: файл с конфигурацией звеньев робота, режим работы, входной и выходной файлы. В случае отсутствия одного или нескольких параметров приложение выдаст информацию о требуемых параметрах (рисунок 3.7). Список параметров работы приложения приведен в таблице 3.2.

```
d:\5>Robot.exe
Usage: General options:
-c [ --ConfigurationFileName ] arg Path to robot config file
-n [ --WorkingMode ] arg Working mode
-i [ --InputFileName ] arg Path to input file
-o [ --OutputFileName ] arg Path to output file

Error: the option '--ConfigurationFileName' is required but missing
Invalid program parameters!
```

Рисунок 3.7 – Вывод программы при отсутствии одного из параметров

Таблица 3.2 – Список параметров работы приложения

Параметр	Значение
c	Путь к файлу конфигурации робота
m	Режим работы приложения (Forward/Inverse)
i	Файл с начальными данными
o	Файл с результатами работы

Файл с конфигурацией робота задается параметром `-c`. Это файл в формате xml. Корневым элементом является элемент *Segments*, в котором содержатся элементы *Segment* описывающие звенья робота и содержащие следующие параметры:

- 1) *JointType* – тип звена (*None = Fixed, RotX, RotY, RotZ*);
- 2) *MinAngle* – минимальный угол разворота звена (-1E5 значение по умолчанию);
- 3) *MaxAngle* – максимальный угол разворота звена (1E5 значение по умолчанию);
- 4) Один или несколько элементов *Frame*, описывающих положение системы координат, связанной со звеном.

Элементы *Frame* в свою очередь содержат параметры:

- 1) *Alfa* – поворот системы координат относительно оси X (0.0);
- 2) *Beta* – поворот системы координат относительно оси Y(0.0);
- 3) *Gamma* – поворот системы координат относительно оси Z(0.0);
- 4) *X* – смещение системы координат по оси X(0.0);
- 5) *Y* – смещение системы координат по оси Y(0.0);
- 6) *Z* – смещение системы координат по оси Z(0.0).

Результирующее размещение системы координат, связанной со звеном, вычисляется как произведение всех элементов *Frame*. При отсутствии какого-либо параметра его значение берется по умолчанию. Фрагмент файла конфигурации представлен на рисунке 3.8

```

<Segments>

  <Segment>
    <JointType>RotZ</JointType>
    <MinAngle>-3.14159265359</MinAngle>
    <MaxAngle>3.14159265359</MaxAngle>
    <Frame>
      <Alfa>0.0</Alfa>
      <Beta>0.0</Beta>
      <Gamma>0.0</Gamma>
    </Frame>
    <Frame>
      <X>75.0</X>
      <Y>0.0</Y>
      <Z>0.0</Z>
    </Frame>
  </Segment>

  <Segment>
    <JointType>RotY</JointType>
    <MinAngle>-1.57079632679</MinAngle>
    <MaxAngle>2.35619449019</MaxAngle>
    <Frame>
      <Alfa>0.0</Alfa>
      <Beta>0.0</Beta>
      <Gamma>0.0</Gamma>
    </Frame>
    <Frame>
      <X>0.0</X>
      <Y>0.0</Y>
      <Z>905.0</Z>
    </Frame>
  </Segment>

```

Рисунок 3.8 – Фрагмент файла конфигурации

Входной файл для прямой или обратной задачи кинематики `f_input.txt` или `i_input.txt` соответственно, представляют собой текстовые файлы, в которых записаны начальные данные для решения той или иной задачи. Во входном файле для решения прямой задачи кинематики `f_input.txt` через разделитель «;» указываются углы разворота каждого звена. Например, запись «0.0; 1.5708; 0.5315; 2.5792; 0.1; 0.6518» означает, что

$$J_1 = 0.0 \text{ рад;}$$

$$J_2 = 1.5708 \text{ рад;}$$

$$J_3 = 0.5315 \text{ рад;}$$

$$J_4 = 2.5792 \text{ рад;}$$

$$J_5 = 0.1 \text{ рад;}$$

$$J_6 = 0.6518 \text{ рад.}$$

Во входном файле для решения обратной задачи кинематики `i_input.txt` через разделитель «;» указываются углы разворота каждого звена начального состояния робота. Затем в строке идут 12 чисел, описывающих требуемое положение результирующего звена, – направление оси  $X$  (3 координаты), направление оси  $Y$  (3 координаты), направление оси  $Z$  (3 координаты) и положение начала системы координат (3 координаты), например:

0.0; 1.5708; 0.5315; 2.5792; 0.1; 0.6518; 0; -1; 1; 1; -0.7071; -0.7071; -0.0000; -0.7071; 0.7071; 0.0000; 0.0000; 0.0000; -1.0000; -1.4142; 3.8284; 0.0000.

Для более наглядного понимания структуры входных данных для решения обратной задачи кинематики представим данные, описывающие требуемое положение результирующего звена в виде матрицы (рисунок 3.9).

$$\begin{array}{l}
 \text{Проекция орты на ось } X \\
 \text{Проекция орты на ось } Y \\
 \text{Проекция орты на ось } Z
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \left[ \begin{array}{ccc|c}
 \vec{i}_x & \vec{i}_y & \vec{i}_z & X \\
 \vec{j}_x & \vec{j}_y & \vec{j}_z & Y \\
 \vec{k}_x & \vec{k}_y & \vec{k}_z & Z \\
 0 & 0 & 0 & 1
 \end{array} \right]
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 \text{координата } X \\
 \text{координата } Y \\
 \text{координата } Z
 \end{array}$$

Рисунок 3.9 – Структура входных данных обратной задачи кинематики

Файлы с результатами расчета прямой и обратной задач `f_output.txt` или `i_output.txt` соответственно, представляют собой текстовые файлы, в которых записаны решения той или иной задачи. Файлы выходных данных имеют формат, обратный файлам входных данных. Т.е. файл `f_output.txt` представляет собой набор данных, аналогичный рисунку 3.9, а в файле `i_output.txt` выводится строка со значениями углов разворота каждого звена.

При запуске приложения отображаются переданные параметры работы, после чего выполняется поиск решения требуемой задачи. После завершения работы выводится соответствующее сообщение (рисунок 3.10). Результаты работы сохраняются в файле, указанном в параметре `-o`.

```
d:\5>Robot.exe -c robot.xml -m Forward -i f_input.txt -o f_output.txt
Path to robot config file: robot.xml
Working mode: Forward
Path to input file: f_input.txt
Path to output file: f_output.txt
Work successfully complete!
```

Рисунок 3.10 – Успешное завершение работы

Для интеграции данных между установкой прямого лазерного выращивания, а именно, между программой для решения прямой или обратной задач кинематики и контроллером робота M-20iV/25 необходимо представить входные и выходные данные в формат, сопоставимый с форматом данных, отображаемых на пульте робота, а именно:

- а) представить углы поворота звеньев в градусах;
- б) представить проекции орт в виде углов  $W, P, R$ .

Перевод угловой величины из радиан в градусы осуществляется по формуле:

$$\alpha = \frac{\pi \cdot n}{180},$$

где  $\alpha$  – угол в градусах,

$n$  – угол в радианах.

Проекции орт в виде углов  $W, P, R$  определяются согласно таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Расчет углов  $W, P, R$ 

$W$	$P$	$R$
$i_y \geq 0, i_z \geq 0$	$j_z \geq 0, j_x \geq 0$	$k_x \geq 0, k_y \geq 0$
$W = \operatorname{atan}\left(\frac{i_y}{i_z}\right) + \pi$	$P = \operatorname{atan}\left(\frac{j_x}{j_z}\right) + \pi$	$R = \operatorname{atan}\left(\frac{k_y}{k_x}\right) + \pi$
$i_y < 0, i_z > 0$	$j_z < 0, j_x > 0$	$k_x < 0, k_y > 0$
$W = \operatorname{atan}\left(\frac{i_y}{i_z}\right) + 2\pi$	$P = \operatorname{atan}\left(\frac{j_x}{j_z}\right) + 2\pi$	$R = \operatorname{atan}\left(\frac{k_y}{k_x}\right) + 2\pi$
$i_y < 0, i_z < 0$	$j_z < 0, j_x < 0$	$k_x < 0, k_y < 0$
$W = \operatorname{atan}\left(\frac{i_y}{i_z}\right)$	$P = \operatorname{atan}\left(\frac{j_x}{j_z}\right)$	$R = \operatorname{atan}\left(\frac{k_y}{k_x}\right)$

С целью верификации адекватной работы программы требуется проверка направления и плоскости поворота для каждого звена. Для отладки файла конфигурации использовалась прямая задача кинематики. Для этого в файле конфигурации для каждого блока звена проводилась проверка корректности выходных данных.

Поскольку система управления роботом выдает на обучающем пульте только координаты и ориентацию фланца и инструмента, необходимо последовательно проверять каждое звено отдельно. Проверка и корректировка осуществлялась с помощью графического метода в соответствии с рисунком 3.11.

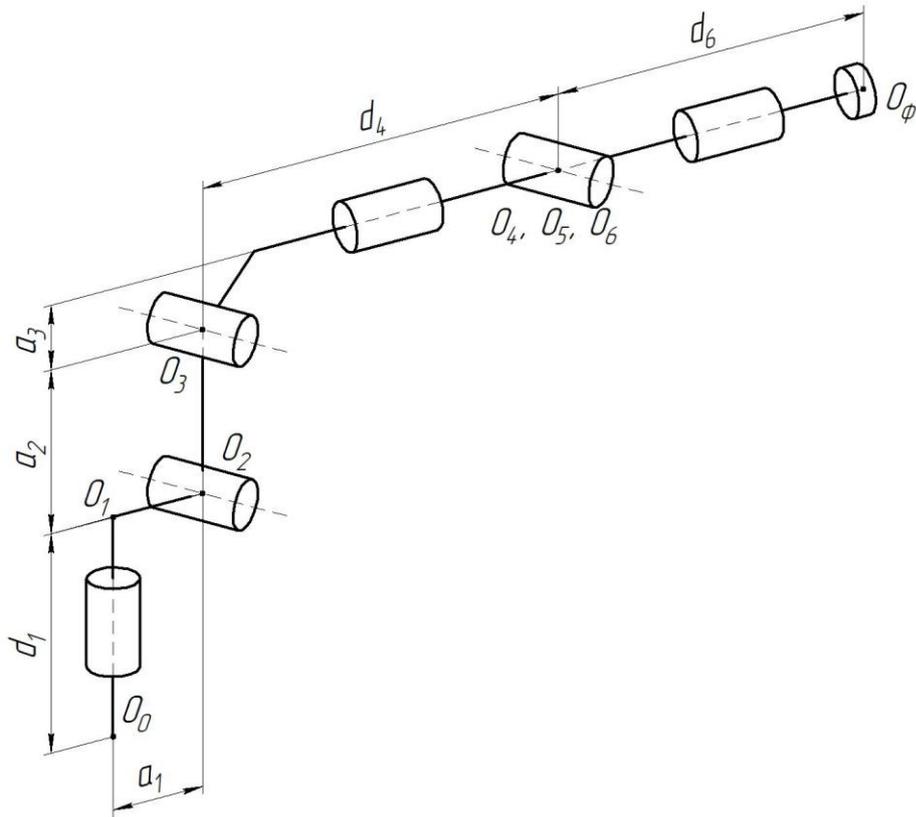
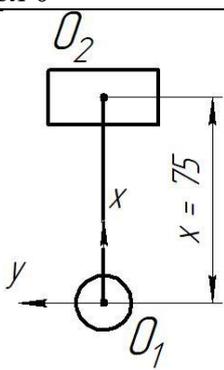
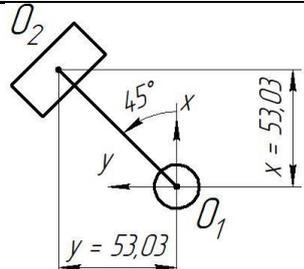
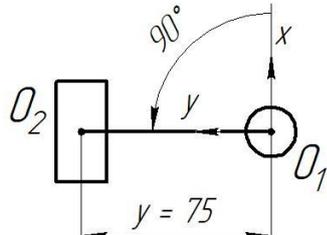


Рисунок 3.11 – Схематическое представление шестиосевого робота

Поскольку мировая система координат робота сонаправлена с осью вращения первого звена и расположена на уровне начала координат второго звена, за нулевую точку мировой системы координат примем точку  $O_1$ , а не  $O_0$ . Вследствие этого величина  $d_1$  вырождается и принимается равной нулю.

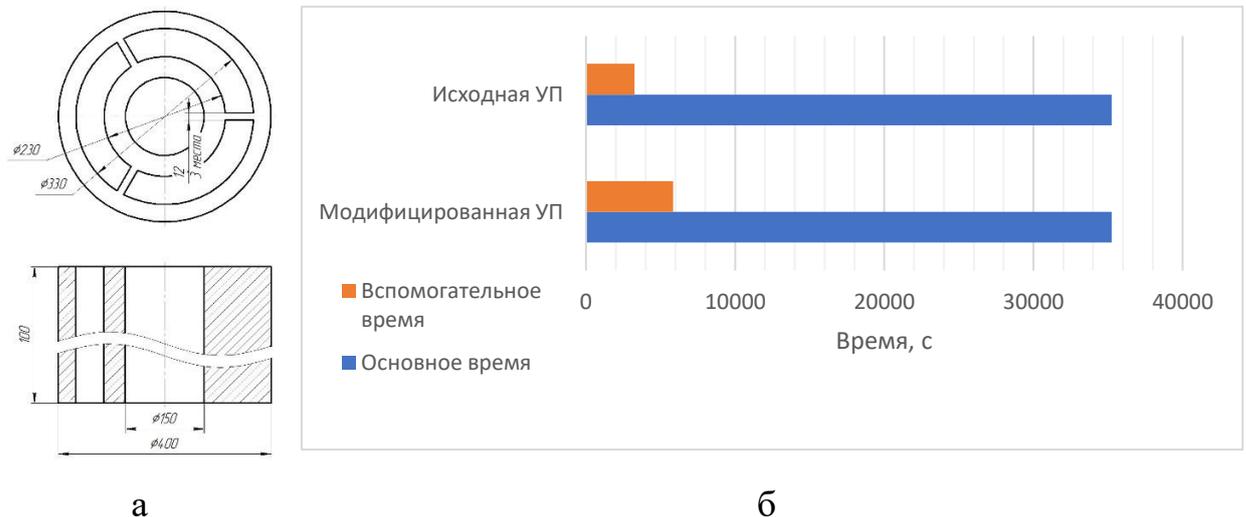
Проверка вращательной пары первого звена подразумевает вращение точки  $O_2$  вокруг  $O_1$ . При этом сопоставляются значения координат конечного звена (в данном случае  $O_2$ ), полученные графическим методом и с помощью программы. Результаты проверки представлены в таблице 3.4, при этом в строке результатов вычисления программы последние три значения описывают текущие координаты конечного звена относительно начала мировой системы координат. Аналогично производится проверка остальных звеньев.

Таблица 3.4 – Верификация работы программы

Угол 0°	
Графическое решение	
Результат вычисления программы	<pre>In [1]: runfile('D:/src2/test.py', wdir='D:/src2') [1.0, 0.0, 0.0, 0.0, 1.0, 0.0, 0.0, 0.0, 1.0, 75.0, 0.0, 0.0]</pre>
Угол 45°	
Графическое решение	
Результат вычисления программы	<pre>In [2]: runfile('D:/src2/test.py', wdir='D:/src2') Reloaded modules: robotHelper [0.7071, -0.7071, 0.0, 0.7071, 0.7071, 0.0, 0.0, 0.0, 1.0, 53.033, 53.033, 0.0]</pre>
Угол 90°	
Графическое решение	
Результат вычисления программы	<pre>In [3]: runfile('D:/src2/test.py', wdir='D:/src2') Reloaded modules: robotHelper [0.0, -1.0, 0.0, 1.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 1.0, 0.0, 75.0, 0.0]</pre>

После проверки геометрическим методом была выполнена проверка соответствия значений, выдаваемых на пульте робота. Для этого робот с помощью шарнирных движений «Joint» выставлялся в необходимые углы, одновременно выдавая декартовы координаты положения фланца робота относительно мировой системы координат. Затем такие же значения углов вносились в программу и на выходе выдавались значения, соответствующие реальному текущему положению робота.

Для апробации функционала была выращена заготовка, эскиз которой представлен на рисунке 3.12а. На рисунке 3.12б показано сравнение времени выращивания по исходной УП и с использованием средств технологической подготовки для создания управляющих программ, откуда видно, что применение математической модели формирования траекторий многоосевой наплавки позволяет оптимизировать процесс выращивания с точки зрения уменьшения вспомогательных движений и исключения паразитных движений. В этом случае время выращивания уменьшилось с 41055 с до 38491 с, то есть на 7%. При этом, из-за непрерывной подачи порошка и технических газов (аргона) при выращивании, сокращение времени позволило сэкономить 1 кг порошка и 1 м<sup>3</sup> аргона.



а – эскиз заготовки, б – сравнение времени выращивания

Рисунок 3.12 – Апробация средств технологической подготовки

### Выводы по главе 3

1. Для управления роботом – через УП или с пульта обучения – контроллер робота решает обратную задачу кинематики, в которой координаты точки рабочего пространства робота представляются в виде углов поворота звеньев так, чтобы РТИ совпадала с заданной точкой. В подавляющем большинстве случаев эта задача решается в матричном виде в

нотации Денавита-Хартенберга, где каждое звено задается с помощью четырех параметров.

2. В главе показано подробное решение обратной задачи кинематики для шестизвенного робота на основе параметров Денавита-Хартенберга. Подставляя значения координат и ориентации инструмента, можно получить углы поворота звеньев робота.

3. Разработаны средства технологической подготовки для создания управляющих программ для роботизированных установок прямого лазерного выращивания на базе математической модели формирования траекторий многоосевой наплавки крупногабаритных деталей авиационных ГТД. Средства технологической подготовки позволяют получать управляющие программы с возможностью формирования адаптивных траекторий и значения углов поворота звеньев робота и позиционера для симуляции движений в САМ-системе.

## ГЛАВА 4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОГРАНИЧЕНИЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЗАГОТОВОК КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ ГТД

### 4.1 Технологические ограничения

Схему генерации управляющей программы с учетом формирования слоев при многоосевой наплавке следует разделить на два блока: блок технологических параметров и блок генерации траектории (рисунок 4.1). К первому стоит относить набор данных, которые определяют параметры режимов выращивания, скорости ходов, величины подач порошкового материала и технических газов. Ко второму блоку относятся совместная работа манипулятора и позиционера – траектории движения рабочего инструмента, а именно, подводы, рабочие ходы, отводы и переходы.

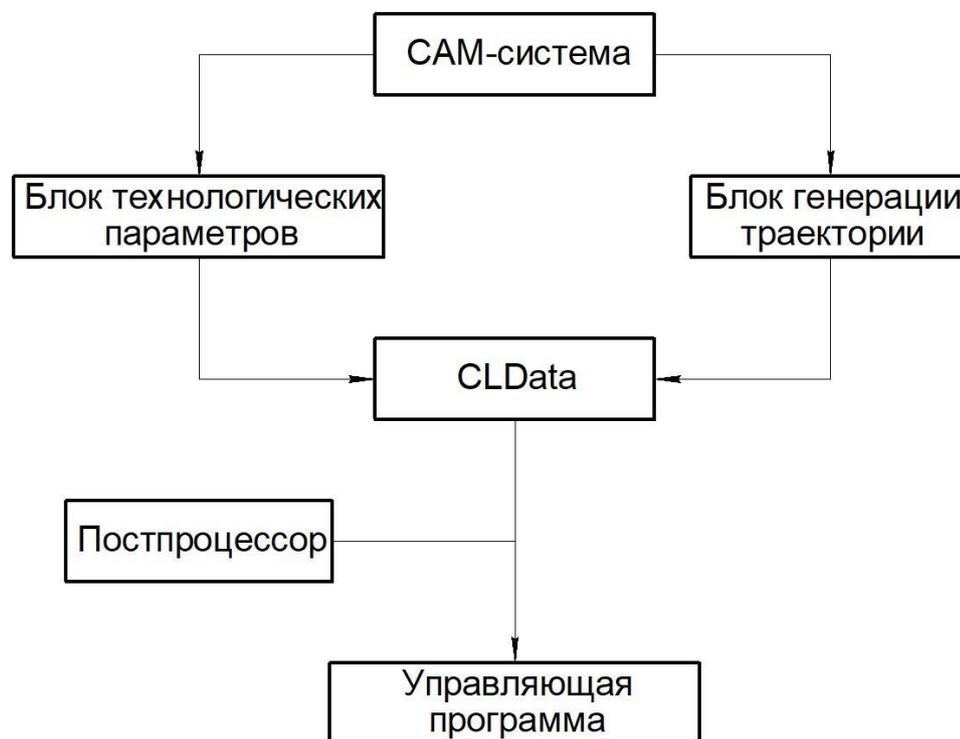


Рисунок 4.1 – Схема генерации управляющей программы

Также, как и в других технологиях, в прямом лазерном выращивании имеются собственные аспекты, формирующие технологические ограничения.

Нагляднее всего будет представить их в виде проблем с точки зрения технологии прямого лазерного выращивания, которые наиболее часто встречаются в данном процессе (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Проблемы, характерные для процесса ПЛВ

Проблема	Описание	Рекомендация
Проблемы, связанные с технологией ПЛВ		
Отрыв заготовки	Заготовку отрывает от платформы построения в процессе выращивания	Применять приплавочные слои
Неровная поверхность слоя	Слой имеет неправильную форму: крайние валики не достигают заданной высоты по сравнению с центральными валиками	Назначить отдельные массовые расходы порошка на каждую группу валиков
Неровная поверхность валика	На замкнутых траекториях при выращивании появляется «провал»; на незамкнутых искажается начало и конец траектории	Разделять точки начала траекторий по высоте; чередовать направление траекторий
Коробление заготовки	Заготовка претерпевает деформацию в процессе выращивания	Использовать ребра жесткости и стрингеры
Расфокусировка инструмента	Процесс выращивания происходит нестабильно: рабочий инструмент отдалекается и/или приближается к зоне выращивания	Изменить технологические режимы выращивания
Проблемы, связанные с геометрией заготовки		
Наличие нависающих элементов	Ограничения с созданием нависающих элементов	Использовать позиционер, в качестве опорных поверхностей использовать наплавленные элементы
Наличие радиальных отверстий	Верхнюю часть радиальных отверстий невозможно получить без поддерживающих структур	Использовать каплевидную форму отверстий
Проблемы, связанные с кинематикой роботизированной ячейки		
Наклонные стенки несоосны с вертикальными	На переходе между цилиндрическими и наклонными стенками имеется ступенька	Скорректировать положение инструмента
Неосесимметричная форма заготовки	Выращенная заготовка имеет овальную форму	Скорректировать положение скоординированной пары

Рассмотрим рекомендации по решению проблем, приведенных в таблице 4.1.

Отрыв заготовки. При старте выращивания первые слои наплавляются на «холодную» подложку, из-за чего процесс расплавления и перемешивания

материала в ванне расплава отличается от установившегося процесса, в результате термодинамического равновесия. При циклическом процессе нагрева и охлаждения выращиваемой заготовки в процессе ПЛВ, сопровождающимся фазовыми превращениями, в материале накапливаются остаточные напряжения, которые могут достигать значений, равных пределу прочности сплавляемого материала или материала подложки, из-за чего между заготовкой и платформой построения возникают трещины, приводящие к отрыву заготовки.

Чтобы увеличить адгезию заготовки с платформой построения необходимо предусматривать выращивание первых слоев на режиме, отличном от номинального. Данный режим предполагают увеличение объемной плотности энергии за счет снижения скорости с пропорциональным снижением расхода металлпорошковой композиции. На таком режиме происходит лучшее проникновение лазерного луча вглубь подложки, и инициирует интенсивное перемешивание расплава материала заготовки и подложки, в результате чего увеличивается глубина проплавления и, следовательно, площадь контакта валика с платформой построения (рисунок 4.2).

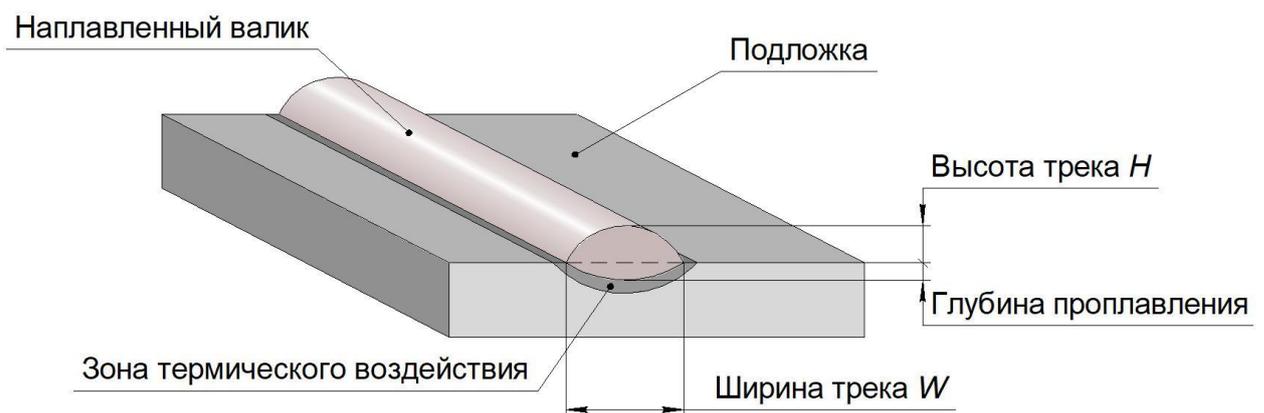


Рисунок 4.2 – Иллюстрация перемешивания металла в ванне расплава

Неровная поверхность слоя. При выращивании элементов, состоящих из трех и более валиков в слое, разделяют валики в зависимости от положения в слое. Существуют три типа валиков: «первый», «внутренние» и «последний».

Расходы подаваемого материала для каждого типа валиков отличаются друг от друга для обеспечения формирования верхней поверхности слоя. При этом валики смещены друг относительно друга на величину перекрытия  $\Delta$  (рисунок 4.3). Коэффициент перекрытия между валиками по ГОСТ 59421-2021 равен отношению перекрытия  $\Delta$  к ширине валика  $W$  и не должен быть менее 0,33 с целью обеспечения удовлетворительного формирования наплавляемого слоя.



Рисунок 4.3 – Расположение валиков в слое

Первый и последний валики находятся по краям слоя, расход на них необходимо увеличивать на 20-30% по сравнению со значением расхода МПК на внутренних валиках. Это следует из того, что при наплавлении крайних валиков они имеют меньшую площадь опоры и часть порошка не попадает в ванну расплава. Поэтому данные валики требуют увеличения расхода МПК для компенсации потерь материала, поступающего в ванну расплава. Внутренние валики выращиваются с меньшим расходом относительно крайних валиков. Расход МПК на внутренних валиках определяется по формуле:

$$R_{\text{внут}} = R_{\text{ном}} \cdot \delta,$$

где  $R_{\text{внут}}$  – расход порошка на внутренних валиках, г/мин,

$R_{\text{ном}}$  – номинальный расход порошка, определяемый аналитическим путем, г/мин,

$\delta$  – коэффициент перекрытия, определяемый по формуле:

$$\delta = \frac{\Delta}{W},$$

где  $\Delta$  – боковой шаг между валиками, мм,  $W$  – ширина валика, мм.

Неровная поверхность валика. Рассмотрим наплавленный валик вдоль направления движения рабочего инструмента. Можно выделить три зоны (рисунок 4.4).



Рисунок 4.4 – Строение валика

В начальной зоне наблюдается выступ профиля валика, которое объясняется разницей между скоростью движения инструмента, в начальный момент (скорость равна нулю) и установившегося режима выращивания при постоянном расходе МПК.

В номинальной зоне происходит выравнивание параметров процесса, и геометрия валика приобретает установившиеся размеры. В конечной зоне происходит выключение лазера и энергии ванны расплава не обеспечивает расплавление подаваемой МПК.

Если на единичном валике эти зоны малозаметны (рисунок 4.5а), то при многослойном выращивании эффект усиливается и вносит существенные искажения геометрии относительно заданной (рисунок 4.5б) [88].



а

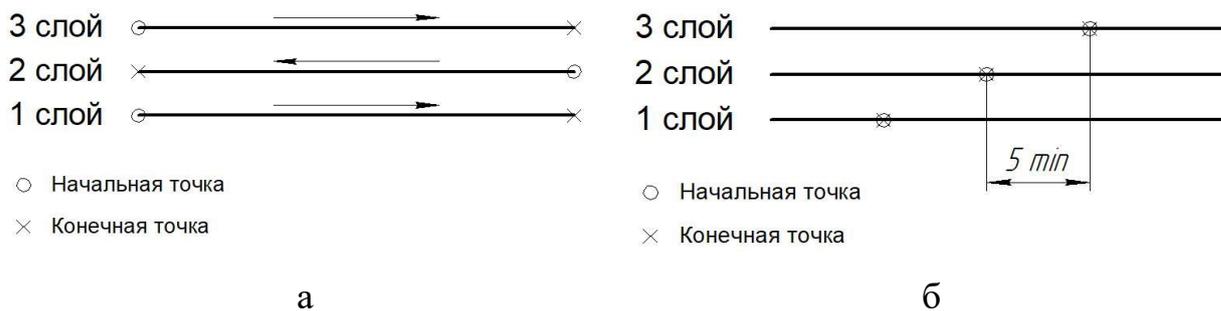
б

а – однократный валик; б – пятикратный валик

Рисунок 4.5 – Единичные валики

Для компенсации искажений от данного эффекта необходимо чередовать направление выращивания в случае незамкнутых траекторий

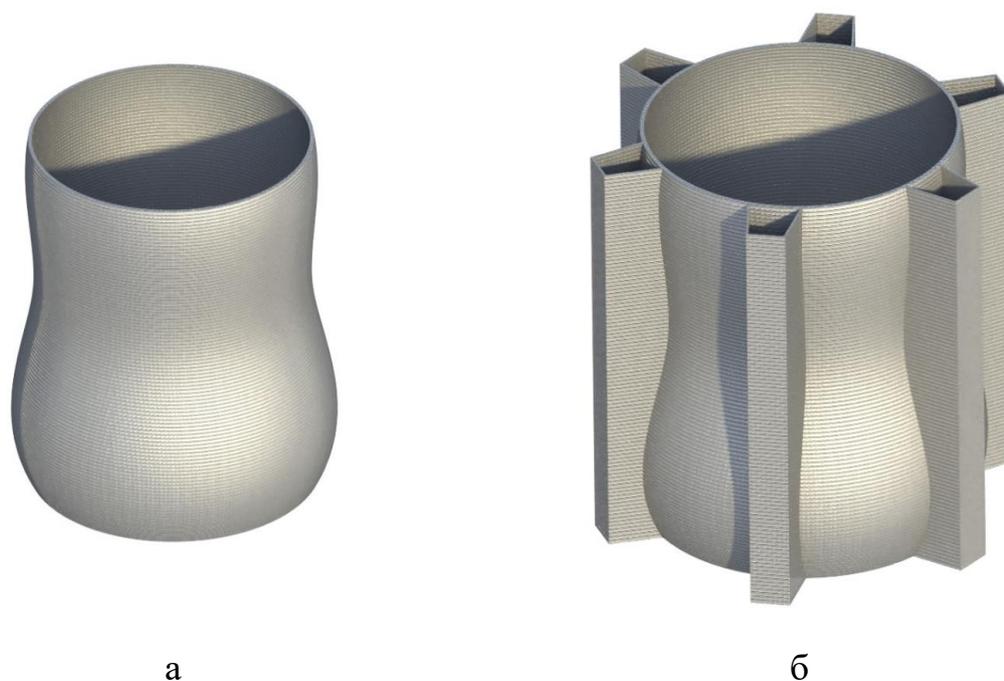
(рисунок 4.6а), а в случае замкнутых – разносить (не менее 5 мм друг от друга) точки старта и окончания выращивания в каждом слое (рисунок 4.6б).



а – стратегия для незамкнутых траекторий; б – стратегия для замкнутых траекторий

Рисунок 4.6 – Стратегии компенсации искажений валиков

Коробление заготовки. При выращивании тонкостенных заготовок (с толщиной в 1 валик), вследствие многократных циклов нагрева и охлаждения, в материале синтезируемой заготовки возникают остаточные напряжения, в результате этого на ней происходит деформация. Для компенсации деформаций рекомендуется использовать дополнительные технологические элементы, ребра жесткости и стрингеры (рисунок 4.7).



а – исходная геометрия; б – изделие с добавленными стрингерами

Рисунок 4.7 – Тонкостенное изделие

Толстостенные заготовки менее подвержены деформации, однако из-за усадки наплавленного металла и деформации подложки геометрия выращенной заготовки может отличаться от заданной. Для решения проблемы усадки материала используют коэффициент усадки, на величину которого масштабируется технологическая модель.

Для компенсации коробления заготовок также используется метод предварительной деформации. Он заключается в изменении исходной модели таким образом, чтобы возникающие в процессе ПЛВ технологические деформации искажали геометрию заготовки до требуемой формы. Для применения этого метода создаётся новая предварительно деформированная модель заготовки. Получить такую модель можно при помощи САЕ-системы с расчетом деформации геометрических размеров заготовки. Затем по предварительно деформированной 3D модели заготовки проводится процесс выращивания и после остывания и отделения заготовки от платформы построения получается заготовка, соответствующая заданным требованиям [89, 90].

Расфокусировка рабочего инструмента. В процессе ПЛВ при формировании валика в ванну расплава поступает не весь объем МПК, подаваемый из сопла. Показателем, отражающим эффективность попадания МПК в ванну расплава, является коэффициент захвата порошка:

$$KЗП = \frac{m_е}{m_о},$$

где  $m_е$  – масса порошка, попавшего в ванну расплава,  $m_о$  – общая масса порошка.

В первую очередь, на КЗП влияет диаметр пятна лазерного излучения. Чем больше диаметр пятна, тем больше ванна расплава и выше вероятность попадания в нее частиц МПК.

Также одним из факторов, влияющим на изменение КЗП в процессе ПЛВ, является износ трубочек, по которым подается МПК. Если заготовка детали крупногабаритная и процесс ее выращивания занимает несколько

суток, то в материале заготовки накапливаются остаточные напряжения, вызванные многочисленными циклами нагрева и остывания, которые приводят к деформации как самой заготовки, так и платформы построения. Из-за этого процесс ПЛВ требует корректировки во время печати.

Снижение количества подаваемого порошка в ванну расплава ведет к изменению геометрии валика и, как следствие, изменению режима наплавки, что может привести к срыву процесса ПЛВ и возникновению брака. Для повышения стабильности процесса ПЛВ используют коэффициент запаса устойчивости, измеряемый в диапазоне от 0 до 0,15, который предназначен для повышения массового расхода порошка и обеспечения устойчивости наплавания при отдалении сопла от ванны расплава. С этой же целью при подготовке управляющей программы закладывают фокальную плоскость инструмента ниже поверхности построения [91].

В процессе ПЛВ случается расфокусировка лазерного излучения и газопорошковых струй из-за:

- деформации платформы построения и выращиваемой заготовки;
- изменения наклона сопла относительно вертикального положения при выращивании наклонных элементов.

В этом случае необходимо изменить вручную расход МПК, или скорректировать значения КЗП и КЗУ.

Наличие нависающих элементов. Процесс ПЛВ позволяет избежать использование поддерживающих структур, направление выращивания слоев должно проходить не строго вертикально от платформы построения, как это происходит в технологии селективного лазерного сплавления, а от определенной опорной поверхности. Например, при выращивании бобышки в качестве опорной поверхности должна использоваться цилиндрическая поверхность (рисунок 4.8).

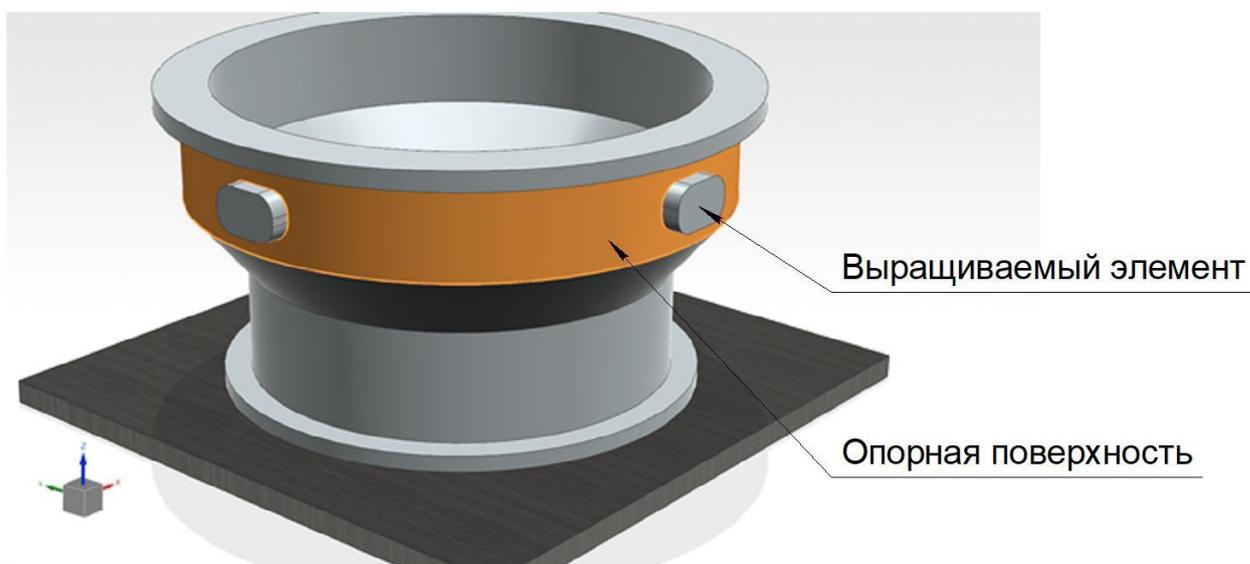


Рисунок 4.8 – Расположение опорной поверхности

Такие нависающие элементы рационально получать с помощью роботизированных ячеек, оснащенных позиционером. Позиционер может обеспечить ориентацию заготовки таким образом, что обеспечивается доступ инструмента для выращивания нависающего элемента. Одной из причин использования позиционера при роботизированном прямом лазерном выращивании является обеспечение создания нависающих элементов без использования поддерживающих структур. Несмотря на то, что в технических характеристиках робота заявлена зона досягаемости в форме полусферы с радиусом около 1800 мм, в установке ПЛВ ИЛИСТ-L эта зона ограничена. Ограничениями выступают, во-первых, стенки рабочей камеры установки, из-за чего зона досягаемости превращается в четверть полусферы и, во-вторых, энергоцепь, подключаемая к рабочему инструменту (рисунок 4.9). Энергоцепь уменьшает радиус выращиваемого изделия за счет возможного контакта со стенкой установки, что может привести к излому оптоволокну, по которому в зону сплавления подводится лазерное излучение. Также энергоцепь накладывает ограничения на ориентацию инструмента, поскольку из-за чрезмерного поворота инструмента энергоцепь сильно натягивается, что может привести к ее повреждению.

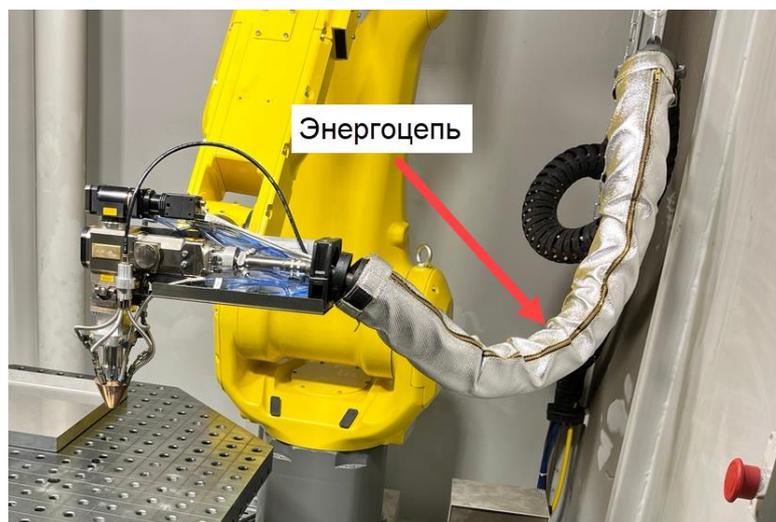


Рисунок 4.9 – Расположение энергоцепи в ИЛИСТ-L

Наклон позиционера позволяет обеспечить доступ рабочего инструмента к области, где выращивается нависающий элемент, а также дает возможность вертикальной ориентации инструмента, тем самым обеспечивая благоприятные условия выращивания.

Поворот позиционера позволяет расширить возможности печати за счет подведения области печати в зону досягаемости робота. Это особенно актуально при выращивании радиально расположенных элементов заготовки, поскольку при движении одного только робота будет происходить наматывание энергоцепи на роботе или заготовке, а также с высокой степенью вероятности произойдет столкновение инструмента с роботом или инструмента со стенками установки. Поворот позиционера дает возможность фиксации робота, при котором движение подачи обеспечивается одним лишь вращением заготовки.

В тех случаях, когда невозможно обеспечить взаимную ориентацию рабочего инструмента и заготовки, при которой выполняется выращивание нависающих элементов конструкции, используются наклонные опорные элементы в качестве поддерживающих структур нависающих элементов. Например, (рисунок 4.10), деталь представляет собой два элементарных структурных элемента: цилиндрическая часть 1 и фланцевая часть 2. В том случае, когда фланец находится слишком близко к столу (подложке),

инструментальная доступность не обеспечивается из-за возможных аварийных ситуаций. В этом случае создается наклонный опорный элемент 3, который выступает опорной поверхностью для фланца и все 3 части выращиваются в одном направлении.

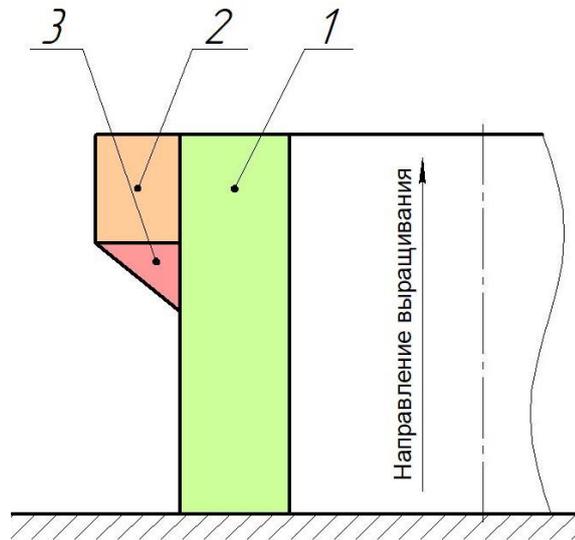
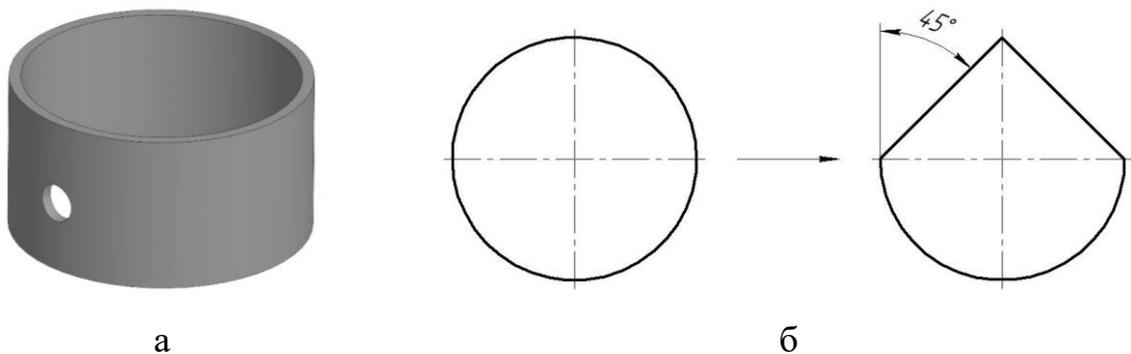


Рисунок 4.10 – Использование наклонных опорных элементов

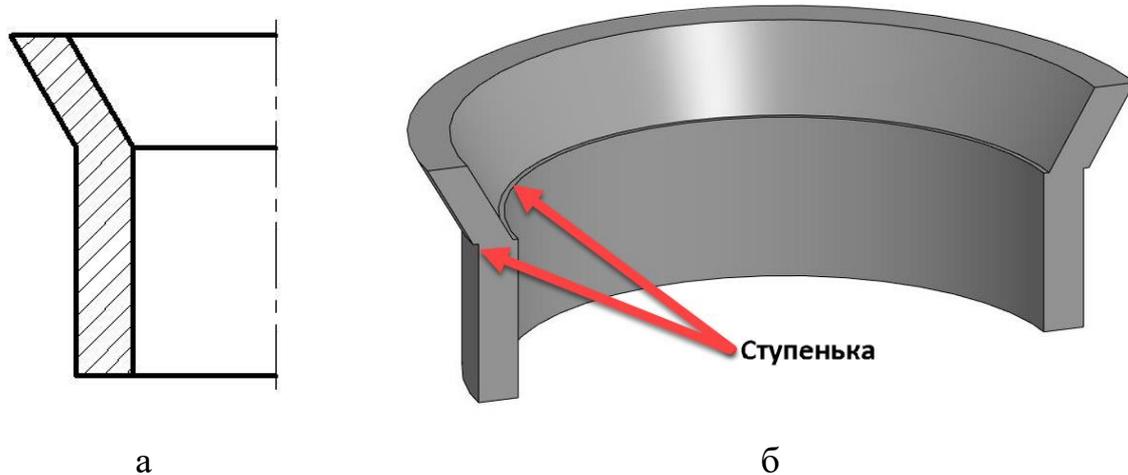
Наличие радиальных отверстий. В случаях, когда деталь имеет радиальные отверстия (рисунок 4.11а), получить их методом ПЛВ невозможно, поскольку верхняя часть отверстия не имеет опор и в данной области наплавляемые валики не будут образовывать заданную геометрию ввиду их сваливания. Для решения этой проблемы такие отверстия необходимо завершать сводом с максимальным углом нависания  $45^\circ$ . При этом отверстие будет иметь форму, представленную на рисунке 4.11б.



а – отверстие в детали; б – измененная форма радиального отверстия

Рисунок 4.11 – Радиальные отверстия

Наклонные стенки несоосны с вертикальными. При выращивании заготовок с наклонными стенками (рисунок 4.12а), на переходе между цилиндрической и наклонной стенками имеется ступенька (рисунок 4.12б).



а – эскиз сечения заготовки; б – расположение ступеньки

Рисунок 4.12 – Расположение ступеньки на заготовке с наклонными стенками

Этот дефект объясняется неверно заданной рабочей точкой инструмента (РТИ), а именно различием между координатами РТИ, записанными в контроллере робота и ее фактическим положением на величину  $\delta$  (рисунок 4.13). В этом случае наклон инструмента на угол  $\varphi$  сопровождается смещением РТИ в плоскости XY на величину  $t$ , которая и определяет ширину образовавшейся ступеньки (рисунок 4.14).

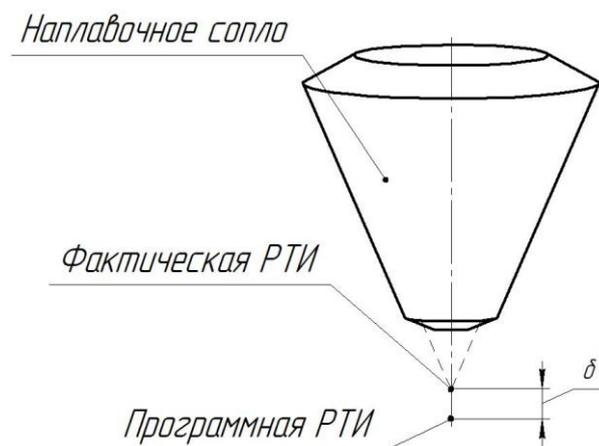


Рисунок 4.13 – Отклонение программной РТИ от фактической

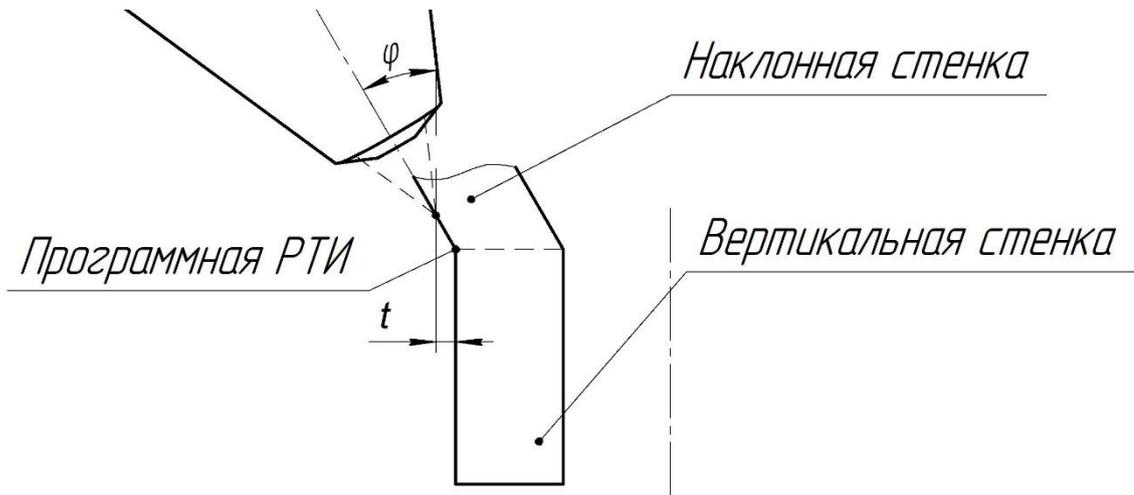


Рисунок 4.14 – Механизм возникновения смещения при наклоне

При настройке инструмента влияют такие факторы, как деформации звеньев, люфты в механизмах, неверные значения параметров Денавита-Хартенберга, записанные в контроллере робота и достичь удовлетворительной точности настройки РТИ бывает затруднительно. Отсюда появляются рекомендации для учета смещения при наклоне:

- 1) Учитывать погрешность настройки инструмента при назначении припусков на постобработку;
- 2) Настраивать РТИ для каждой заготовки индивидуально в зависимости от угла наклона стенок. В этом случае определяется минимально допустимая точность настройки, исходя из угла наклона инструмента и условия, что ступенька не должна превышать четверть диаметра пятна лазера для обеспечения стабильности процесса ПЛВ по формуле:

$$\delta \leq \frac{t}{\sin \varphi} = \frac{D}{4 \sin \varphi},$$

где  $D$  – диаметр пятна лазера, мм.

При этом стоит иметь ввиду, что при выращивании фланцевых элементов заготовки они будут смещены по высоте на величину  $\delta$  в отрицательном направлении оси  $Z$  если программная РТИ дальше от сопла, чем фактическая РТИ, и наоборот. Например, при выращивании

горизонтального фланца ( $\varphi = 90^\circ$ ) и диаметре лазерного пятна 2 мм, фланец будет располагаться на 0,5 мм ниже заданного значения.

Неосесимметричная форма заготовки. После выращивании осесимметричных заготовок большого диаметра (от 300 мм) на операции контроля геометрических параметров у выращенных заготовок может наблюдаться овальность цилиндрических поверхностей, которая объясняется неверно заданной скоординированной парой робот-позиционер. В этом случае эксцентриситет заготовки определяется смещением системы координат, задаваемой при настройке СП от оси вращения позиционера.

На практике установить значения СП для всех положений робота в рабочем пространстве является трудоемкой задачей, поэтому для каждой выращиваемой заготовки СП настраивается индивидуально в зависимости от габаритов заготовки.

Множество отечественных и зарубежных САМ-систем мало приспособлены для аддитивного производства, в частности, для технологии ПЛВ, и не учитывают особенности технологии. Поэтому предлагается разработать модель генерации управляющих программ при многоосевой наплавке для роботизированных установок ПЛВ с учётом технологических ограничений и внедрить её в отечественную САМ-систему «АДЕМ»

## **4.2 Модель формирования слоев с учетом технологических ограничений**

### **4.2.1 Модель формирования внешних и внутренних контуров и области заполнения**

Алгоритм формирования траекторий должен учитывать технологические ограничения, рассмотренные ранее. При формировании слоя необходимо учитывать нумерацию слоя от платформы построения, группы валиков. На рисунке 4.15 представлена модель формирования внешних и внутренних контуров и области заполнения



Рисунок 4.15 – Модель формирования контуров и заполнения

Исходными данными для формирования слоя являются геометрия валика, заготовки, коэффициент перекрытия валиков и стратегия заполнения. Для определения внешних и внутренних контуров необходимо иметь поперечное сечение выращиваемого изделия. В этом сечении определяется контур заготовки и от него эквидистантно строятся линии, отстоящие на величину половины ширины валика (рисунок 4.16).

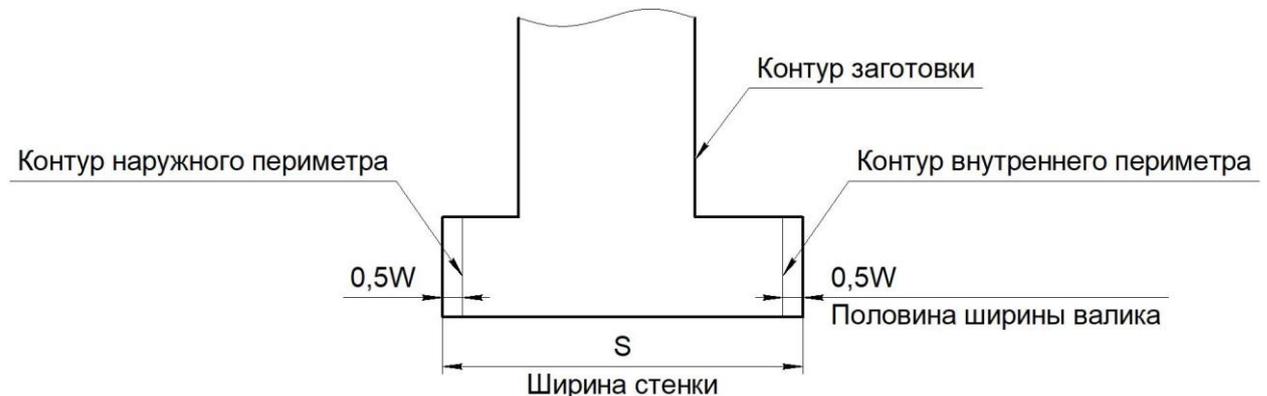


Рисунок 4.16 – Построение наружного и внутреннего периметров

Относительно контуров периметров определяется количество внутренних валиков согласно формуле:

$$n = \left\lceil \frac{S - W}{\delta \cdot W} + 1 \right\rceil,$$

где  $S$  – ширина стенки, мм,  $W$  – ширина валика, мм,  $\delta$  – коэффициент перекрытия валиков, определяемый экспериментально,  $\delta \in [0,55; 0,7]$ .

Затем между первым и последним валиком строятся внутренние в рассчитанном количестве на равном друг от друга расстоянии.

Следующим шагом является определение траектории заполнения слоя. Использование эквидистантной траектории предпочтительно, ввиду того, что технология ПЛВ отлично подходит при выращивании заготовок деталей осесимметричной формы и траектории движения инструмента представляют собой окружности. Аналогичная ситуация и с элементами, имеющими форму параллелепипеда. В этом случае траектории представляют прямолинейные отрезки. Использование эквидистантной траектории позволяет обеспечить неизменный коэффициент перекрытия по всей заготовке.

Спиральная траектория позволяет снизить время выращивания, поскольку минимизируются переходы и заполнение слоя происходит непрерывно. Однако в точках начала и конца таких траекторий будут образовываться области без наплавленного материала. Программное обеспечение hyperMILL от компании Open Mind позволяет выращивать толстостенные изделия, представляющие собой тела вращения, используя спиральную траекторию [92]. В этом случае происходит чередование между слоями радиального направления спирали. Проблему разного массового расхода порошка на первом, внутренних и последнем валиках данное ПО решает путем наклона инструмента в сторону тела заготовки (рисунок 4.17), однако hyperMILL поддерживает только 5-осевую обработку, а использование описанных наклонов инструмента в установках с манипуляторами сомнительно, поскольку может привести к столкновениям.

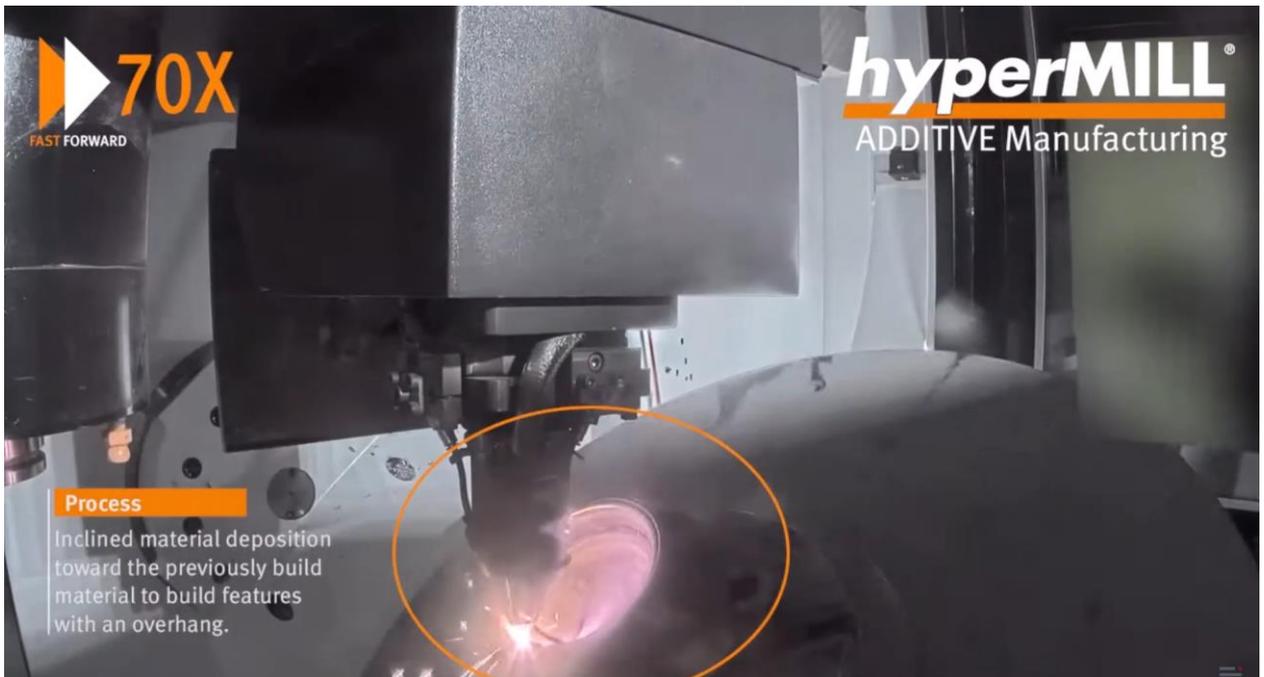


Рисунок 4.17 – Ориентация инструмента относительно заготовки на внутреннем валике

При выращивании изделий, форма слоя которых имеет сложную форму, используются траектории, которые обычно применяются в FDM-печати. В этом случае сначала формируются оконтуривающие валики, а затем происходит заполнение слоя. На рисунке 4.18 показано использование стратегии заполнения «Осцилляция».

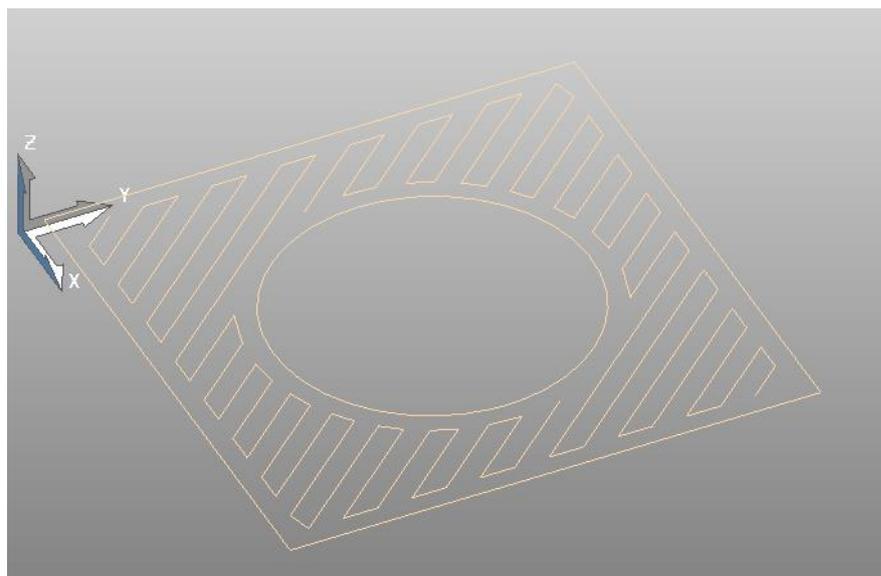


Рисунок 4.18 – Траектории слоя при стратегии заполнения «Осцилляция»

При таком подходе в местах поворота траектории будет наблюдаться изменение коэффициента перекрытия, что сопровождается увеличением наплавленного в данных зонах материала, из-за чего слой становится неплоскостным. Также резкое изменение направления движения снижает точность выращивания по двум причинам. Во-первых, ванна расплава имеет определенную инерционность и может продвигаться за пределы расчетной траектории. Во-вторых, известно, что робот проходит рабочие точки с определенной аппроксимацией траектории, которая в управляющей программе задается параметром CNT (рисунок 4.19).

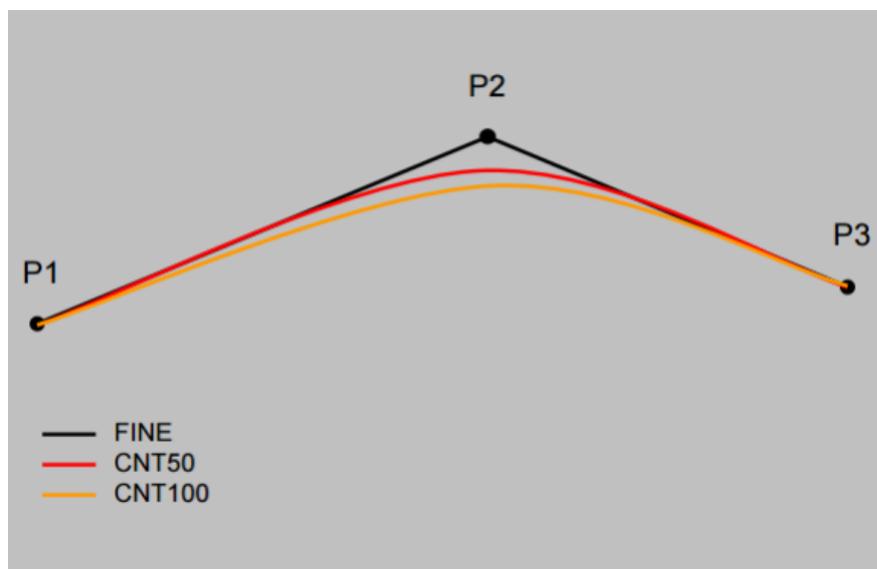


Рисунок 4.19 – Сглаживание CNT-интерполяцией

При использовании интерполяции FINE сглаживание траектории не происходит, и робот проходит через каждую точку с остановкой. В этом случае увеличение времени нахождения в точке P2 приводит к повышению объемной плотности энергии, при которых в данной зоне происходит перегрев материала, влекущий собой появление металлургических дефектов.

Для того чтобы избежать подобной ситуации существует интерполяция CNT. CNT50, CNT100 – интерполяция, которая сглаживает углы. Это может повлиять на точность, но снизит изменение линейной скорости робота в данной точке. При этом, несмотря на использование интерполяции, при

высокой рабочей скорости робот все равно может снизить скорость, поскольку инерция робота может внести сильные ошибки в точность прохождения точки.

Также на формирование слоя влияет время включения и выключения лазера. Перед началом траектории рабочего хода лазер должен заранее включаться, чтобы до начала траектории успела сформироваться ванна расплава, а также заранее выключаться, чтобы ванна расплава, двигающаяся по инерции, не перетекла за пределы траектории. Для замкнутых и незамкнутых траекторий эти времена будут различны. Если время выключения лазера выбрано неправильно, то в точках начала и конца траекторий будут наблюдаться провалы и возвышения.

Исходя из этого, для каждого случая следует режимы выращивания и параметры движения подбираются индивидуально, значения которых обеспечивают удовлетворительное формирование слоя.

Если выращиваемая заготовка негабаритная и формирование одного слоя длится, по крайней мере, меньше одной минуты, то она начинает перегреваться, за счет повышения межпроходной температуры, что сопровождается изменением цвета наплавленного материала и возникновением значительных остаточных напряжений, которые могут привести к образованию макротрещин в теле заготовки и, как следствие, возникновению брака [93]. Для снижения межпроходной температуры используется технологическая пауза, которая позволяет заготовке остыть. Технологическая пауза может быть как для слоя, так и для отдельного валика.

#### **4.2.2 Модель генерации УП с учетом использования позиционера**

Одной из причин использования позиционера при роботизированном прямом лазерном выращивании является обеспечение создания нависающих элементов без использования поддерживающих структур. Несмотря на то, что в технических характеристиках робота заявлена зона досягаемости в форме полусферы с радиусом около 1800 мм, в установке прямого лазерного

выращивания ИЛИСТ-L эта зона сильно ограничена. Ограничениями выступают, во-первых, стенки установки, из-за чего зона досягаемости превращается в четверть полусферы и, во-вторых, энергоцепь, подключаемая к рабочему инструменту. Энергоцепь уменьшает радиус выращиваемого изделия за счет возможного контакта со стенкой установки, что может привести к излому оптоволокну, по которому в зону сплавления подводится лазерное излучение. Также энергоцепь накладывает ограничения на ориентацию инструмента, поскольку из-за чрезмерного поворота инструмента энергоцепь сильно натягивается, что может привести к ее повреждению.

Наклон позиционера позволяет обеспечить доступ рабочего инструмента к области, где выращивается нависающий элемент, а также дает возможность вертикальной ориентации инструмента, тем самым обеспечивая благоприятные условия выращивания.

Поворот позиционера позволяет увеличить зону печати за счет подведения области печати в зону досягаемости робота. Это особенно актуально при выращивании горизонтальных элементов по окружности, поскольку при движении одного только робота будет происходить наматывание энергоцепи на роботе или заготовке, а также с высокой степенью вероятности произойдет столкновение инструмента с роботом или инструмента со стенками установки. Поворот позиционера дает возможность фиксации робота, при котором движение подачи обеспечивается одним лишь вращением заготовки.

Для создания управляющих программ, в которых задействуется робот и позиционер необходимо программное обеспечение, в котором имеется возможность работы с таким роботизированными ячейками. При этом такой софт должен поддерживать аддитивный профиль, позволяющий создавать УП для аддитивных процессов. В любой САМ-системе, поддерживающей аддитивную обработку, создание выращиваемого элемента состоит из двух частей. В первой части определяются границы выращиваемого элемента, а во второй определяют опорную поверхность, от которой происходит

выращивание элемента. Исходя из этого, появляется необходимость разделения заготовки на зоны, отличающихся друг от друга направлением выращивания. В этом ключе появляется необходимость работы с элементарными объектами 3D-модели, откуда следует, что файлы стереолитографии – стандартный формат 3D-моделей, используемый в аддитивном производстве – не подходят. Рекомендованными форматами для работы с объектами выступают такие расширения файлов как x\_t и step.

Модель генерации УП с учетом использования позиционера показана на рисунке 4.20.

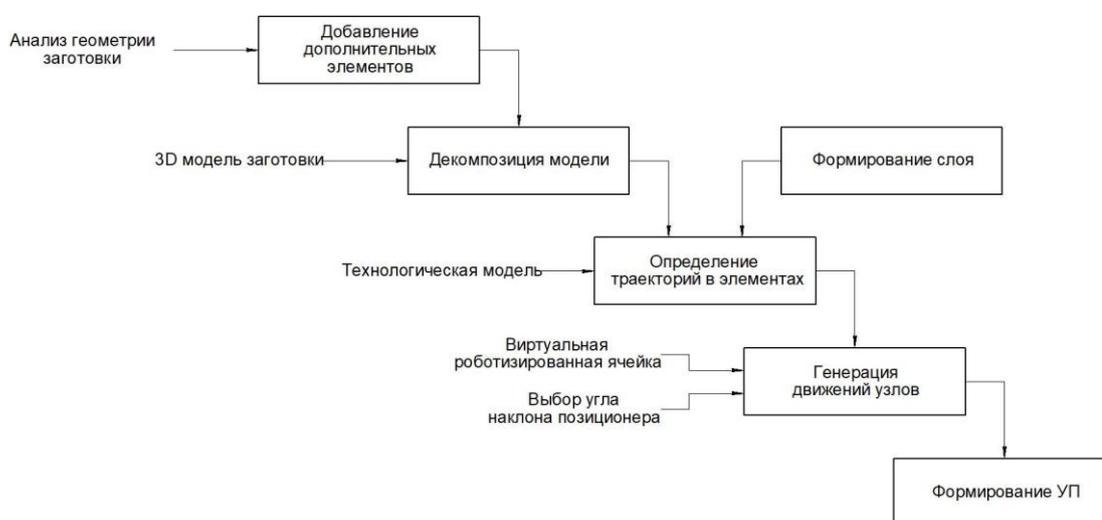


Рисунок 4.20 – Модель генерации УП  
с учетом использования осей позиционера

После того, как к программисту управляющих программ поступает файл 3D-модели заготовки, необходимо ее проанализировать на предмет добавления дополнительных компонентов. Одним из основных таких компонентов является компенсационный слой, который служит для стабилизации режима выращивания и выравнивания химического состава наплавленного материала между подложкой и заготовкой [94]. Обычно высота такого слоя составляет 10-15 мм. Также бывают случаи, когда деталь относится к изделиям общего назначения [95], а материал подложки совпадает с наплаваемым материалом. В этом случае (по согласованию с заказчиком) компенсационный слой не вводится, а подложка выступает в качестве части

заготовки. К остальным дополнительным компонентам относят стрингеры, ребра жесткости и разводы. Стрингеры и ребра жесткости, как это было сказано ранее, служат для повышения жесткости тонкостенной заготовки и позволяют снизить коробление при выращивании. Разводы используются в качестве поддерживающих структур нависающих элементов в тех случаях, когда невозможно обеспечить такую взаимную ориентацию рабочего инструмента и заготовки, при которых выполняется выращивание нависающих структур.

После того, как были введены дополнительные элементы, совершается декомпозиция 3D-модели. На этом этапе модель разбивается на элементы, которые возможно вырастить, не меняя при этом ориентацию инструмента и наклон позиционера.

Когда декомпозиция закончена, для каждого элемента определяются стратегии траекторий и присваиваются технологические команды и их значения.

На следующем этапе загружается виртуальная роботизированная ячейка, на которой происходит симуляция и верификация обработки. Перед симуляцией каждого элемента программист самостоятельно указывает углы наклона и атаки инструмента, а также угол наклона позиционера.

### **4.3 Разработка технического задания для программной реализации в САМ-системе «АДЕМ»**

Структурно техническое задание можно разделить на разработку двух блоков: САМ-модуля и постпроцессора.

САМ-модуль должен:

- 1) Обеспечивать работу с 3D объектами. Для создания траекторий обработки того или иного элемента необходимо обозначить его границы. Этими границами служат поверхности, к которым присваивается статус опорной поверхности или поверхности силуэта элемента.

2) Позволять создавать аддитивный инструмент, который при симуляции обработки добавляет материал при движении по траектории рабочего хода. Инструмент должен иметь параметры, позволяющие определить размеры наплавляемого валика. К этим параметрам относят высоту валика и диаметр лазерного пятна. Также должны задаваться координаты рабочей точки инструмента относительно нулевой точки инструмента, а также номер инструмента.

3) Иметь возможность внесения технологических параметров, таких как скорость переходов, скорость рабочих ходов, высота слоя, шаг между валиками, время паузы, которые отображаются при симуляции и участвуют при подсчете времени выращивания.

4) Иметь возможность внесения технологических параметров процесса, которые при симуляции не задействованы, однако отображаются в управляющей программе и определяют ряд процессов, происходящих при сплавлении порошкового материала. К таким параметрам относят:

- время задержки или опережения включения лазерного излучения;
- мощность лазерного излучения на первых, внутренних и последних валиках;
- массовый расход порошка на первых, внутренних и последних валиках;
- расходы аргона на транспортной и защитных магистралях;
- величины интерполяции траектории в рабочих точках;
- величину технологической паузы.

5) Давать возможность выбора выращиваемого конструктивного элемента (стенка, бобышка), траекторий рабочих ходов (зиг-заг, эквидистантная), величины и типы подводов и отводов (касательный, радиальный и т.д.).

6) Давать возможность редактирования траекторий – создание массива, копирование, перемещение, масштабирование.

7) Иметь опцию оптимизации объема управляющих программ, поскольку объем памяти контроллера сильно ограничен. Например, для контроллера Fanuc R-30iB объем памяти составляет 127732 Кбайт, а объем одного фрагмента УП, содержащий 2000 точек, составляет 600 Кбайт, появляется сильное ограничение по количеству точек, определяющих траекторию обработки заготовки. Максимальное число точек в этом случае составляет около 425 000 точек, что подходит для создания 1-2 среднегабаритных заготовок с длительностью печати до 2 суток без необходимости очистки и перезаписи файлов. Сложности возникают, при выращивании изделий с длительностью печати от 5 суток и более. В этом случае традиционно на пульт обучения перемещается максимально возможная часть программ, инициируется запуск печати и при приближении к концу последней программы первые УП удаляются и на их место перемещаются оставшиеся. Этот метод работоспособен, однако несет в себе ряд проблем. При переносе второй части управляющих программ оператор может допустить ошибку и переместить не все программы, что приведет к останову оборудования и усадке заготовки в процессе простоя. Также из-за низкой скорости передачи исполнительных файлов (приблизительно 10-15 Кбайт/с) только перенос УП может занимать несколько часов. Решением данной проблемы является снижение объема управляющих программ за счет:

а) применения метода круговой интерполяции, благодаря которому можно сократить описание дугового участка траектории всего тремя опорными точками вместо множества промежуточных координат, полученных линейной аппроксимацией, в виде  $C P[N+1] P[N+2] R[100]mm/sec$   $CNT R[3] COORD$  (для роботов Fanuc), где текущая (начальная) точка имеет индекс  $N$ , промежуточная  $N+1$ , а конечная  $N+2$ ;

б) обеспечения связи объема управляющих программ с точностью – при уменьшении точности интерполяции снижается количество точек и, следовательно, объем УП. Возможность локального значения точности для выделенной области.

в) использования циклов.

Постпроцессор должен:

1) Генерировать управляющую программу в формате, соответствующим контроллеру робота.

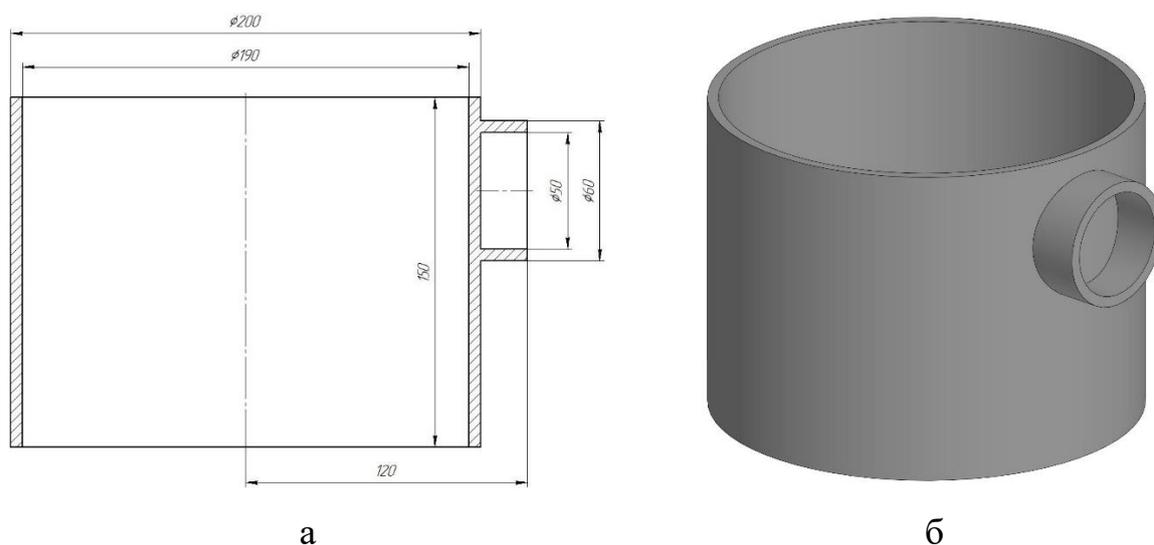
2) Разбивать код управляющей программы на фрагменты, которые поочередно вызываются из главной программы.

3) В главной программе указывать все переменные – регистры, которые используются в процессе выращивания. К ним относятся регистры значений времени задержки или опережения включения лазерного излучения, мощности лазера, массовых расходов порошка, расходов аргона, величин интерполяции траектории в рабочих точках, величин технологической паузы, а также скорости рабочих ходов и переходов.

4) После отработки всех подпрограмм код УП должен содержать в себе фрагмент с выключением лазерного излучения, подачи порошка и технологических газов. При этом выключение газов должно происходить с определенной задержкой, чтобы исключить попадание порошинок на оптику сварочной головки.

#### **4.4 Апробация разработанного функционала**

На основании требований, изложенных в техническом задании для программной реализации функциональной модели в САПР АТ «Компас-АДЕМ», была разработана пробная заготовка, для которой создание управляющей программы будет охватывать все требования, отраженные в ТЗ. Данная заготовка представлена на рисунке 4.21.



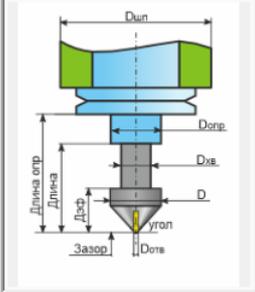
а – эскиз заготовки, б – 3D модель заготовки

Рисунок 4.21 – Пробная заготовка

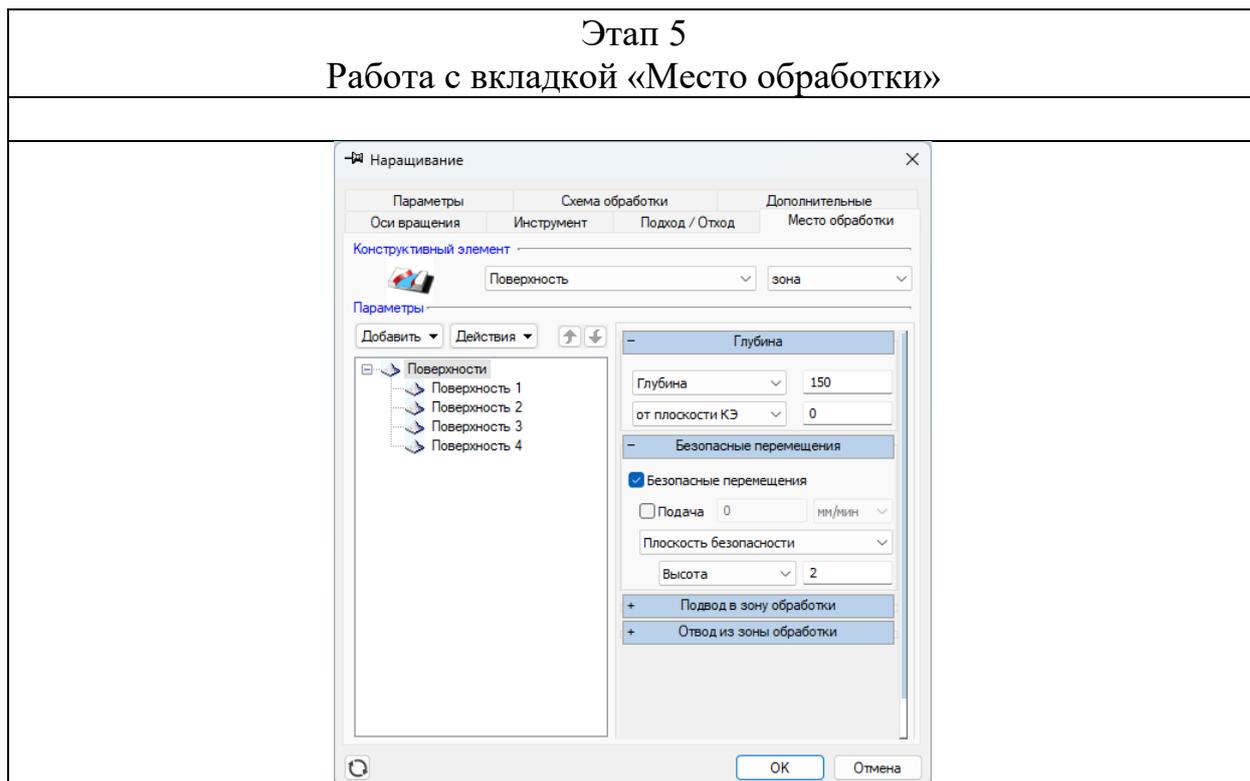
При выращивании с помощью технологии прямого лазерного выращивания рационально разделить заготовку на два элемента: цилиндр с размерами  $\text{Ø}200 \times 150$  мм и цилиндр с размерами  $\text{Ø}60 \times 20$  мм, располагающийся на внешней стенке первого цилиндра.

Для создания обработки в САМ-модуле системы Adem создается операция «Наращивание», в которой создается инструмент, указываются режимы, стратегия и место обработки. Важно отметить, что интерфейс данной операции сделан по шаблонам по созданию операций механической обработки и на данный момент является альфа-версией, в которой отрабатываются функции, необходимые для создания аддитивной операции. Поэтому множество функций, которые будут показаны ниже, например, излишние геометрические параметры инструмента, а также вкладки «Оси вращения» и «Дополнительные», в расчете аддитивных траекторий не участвуют и являются паразитными. В будущем эти функции будут удалены. В таблице 4.2 показано подробное поэтапное создание операции «Наращивание» для создания цилиндра  $\text{Ø}200 \times 150$  мм.

Таблица 4.2 – Этапы создания траекторий

Этап 1 Работа с вкладкой «Параметры»	Этап 2 Работа с вкладкой «Схема обработки»
<p>Нарращивание</p> <p>Оси вращения   Инструмент   Подход / Отход   Место обработки</p> <p>Параметры   Схема обработки   Дополнительные</p> <p>Конструктивный элемент</p> <p>Поверхность</p> <p>Параметры перехода</p> <p>Направление: Попутное <input type="checkbox"/> Аппроксимация: 0.01</p> <p>Шаг: мм 1.67</p> <p>Проходов: 0</p> <p>Выстой, сек: 40</p> <p>Подачи</p> <p>Основная подача: 1500 мм/мин</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Подача ускоренная: 20000 мм/мин</p> <p>Описание перехода</p> <p>OK Отмена</p>	<p>Нарращивание</p> <p>Оси вращения   Инструмент   Подход / Отход   Место обработки</p> <p>Параметры   Схема обработки   Дополнительные</p> <p>Схема обработки</p> <p>Эквидистанта</p> <p>Угол: 0 <input type="checkbox"/> НТК</p> <p>Смещение 1-го прохода: 0 <input type="checkbox"/> Из центра с изменением направления</p> <p>R скруг. min: 0 <input type="checkbox"/> Из центра без изменения направления</p> <p>Обход острых углов: По прямой <input type="checkbox"/> Реверс траектории</p> <p><input type="checkbox"/> Автоопределение областей и угла</p> <p><input type="checkbox"/> Схема заполнения</p> <p>Эквивалент</p> <p>Шаг/сторона: 0 <input type="checkbox"/> Аппроксимация: 0.01</p> <p>Угол заполнения: 0 <input type="checkbox"/> Сначала внешний слой</p> <p>Ширина внешнего слоя: 0</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Многопроходная обработка по Z</p> <p>Глубина прохода: 0.8</p> <p><input type="checkbox"/> Упрощение обработки</p> <p>Max. отклонение от модели: 0</p> <p>OK Отмена</p>
Этап 3 Работа с вкладкой «Инструмент»	Этап 4 Работа с вкладкой «Подход / Отход»
<p>Нарращивание</p> <p>Параметры   Схема обработки   Дополнительные</p> <p>Оси вращения   Инструмент   Подход / Отход   Место обработки</p> <p>Параметры инструмента</p> <p>Сопло экстр.:</p>  <p>Позиция: 10</p> <p>Инструментальная головка: 1</p> <p>Параметры</p> <p>Диаметр: 2.5</p> <p>Длина реж. части: 11</p> <p>Длина: 1</p> <p>Угол: 45</p> <p>Длина эффективная: 1</p> <p>Диаметр отв. сопла: 0.2</p> <p>Дополнительные параметры</p> <p>Обозначение</p> <p>Корректоры</p> <p>Вылеты</p> <p><input type="checkbox"/> Использовать контур</p> <p>Описание инструмента</p> <p>#10 Сопло экструдера (D2.5)</p> <p>OK Отмена</p>	<p>Нарращивание</p> <p>Параметры   Схема обработки   Дополнительные</p> <p>Оси вращения   Инструмент   Подход / Отход   Место обработки</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Подход</p> <p>Линейный касательно <input type="checkbox"/> Подача: 0 мм/мин</p> <p>Длина: 10</p> <p>Угол: 0</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Отход</p> <p>Линейный касательно <input type="checkbox"/> Подача: 0 мм/мин</p> <p>Длина: 10</p> <p>Угол: 0</p> <p>OK Отмена</p>

## Окончание таблицы 4.2



На первом этапе указываются конструктивный элемент «Поверхность», который задает тип текущего выращиваемого элемента и определяет вспомогательные движения инструмента. Также указывается боковое смещение – шаг между валиками внутри слоя, который составляет две трети ширины валика. В данном случае валик имеет ширину 2,5 мм, поэтому шаг между валиками составляет 1,67 мм.

Число проходов определяет количество повторений траектории и полезно при выращивании наклонных отвесных элементов, когда наплавляемые валики не получают требуемое количество порошкового материала, а увеличение расхода порошка приводит к резкому снижению КЗП и незначительному приближению текущей геометрии валика к требуемой. В этом случае гораздо эффективнее повторить данный валик, не изменяя режим выращивания. В данном случае повторы не требуются, поэтому в поле «Проходов» указывается 0.

Выстой необходим в тех случаях, когда заготовка в процессе синтеза перегревается. Как это было сказано ранее, паузу следует использовать, если

время наплавки одного валика составляет менее 1 минуты. Так как для наплавки одного валика на диаметре 190 мм при скорости 25 мм/с время рабочего хода составляет 24 секунды, то вводится межпроходная пауза 40 с. Также указываются величины рабочей и ускоренной подачи. Если не ставить галочку напротив «Подача ускоренная», то скорость переходов будет равняться скорости рабочего хода.

Во втором этапе определяется стратегия обработки. Для выращивания тел вращения рационально использовать эквидистантную схему. По этой же причине нет смысла использовать отдельную стратегию для заполнения. Схема заполнения используется при синтезе сложнопрофильных изделий, где внутренние эквидистантные траектории могут вырождаться и приводить к появлению области несплавлений. В этом случае периметры обрабатываются с помощью эквидистантной стратегии, а заполнение зигзагом.

В этой же вкладке указывается параметр «Многопроходная обработка по Z» и указывается высота слоя в миллиметрах. Выключенный параметр многопроходной обработки означает генерацию одного слоя. Параметр «Упрощение обработки» позволяет включить оптимизацию УП, о которой было сказано ранее. В этом случае в выходном файле движение будет задаваться циклами, где тело цикла соответствует обработке одного слоя. Сравнение структуры стандартной и оптимизированной УП будет произведено позднее в данной главе.

В третьем этапе происходит определение инструмента. Указываются диаметр пятна лазерного излучения (ширина формируемого валика) 2,5 мм и фокусное расстояние 11 мм. Также указывается позиция инструмента, номер которого должен совпадать с номером системы координат инструмента, заданный на пульте обучения робота.

На четвертом этапе задаются подходы и отходы. По умолчанию для технологии ПЛВ подходы и отходы являются прямолинейными касательными к рабочей траектории отрезками с длиной 10 мм, скорость которых совпадает со скоростью рабочей подачи, однако, если требуется выбрать другую

скорость подхода или отхода, то можно поставить галочку напротив команды «Подача» и указать требуемую величину в мм/мин.

На пятом этапе определяется место обработки. Указываются поверхности, определяющие границы выращиваемого элемента, а также безопасные перемещения, при необходимости скорость движения переходов в зоне безопасности (по умолчанию это скорость ускоренной подачи), тип зоны безопасности и ее смещение по высоте от выращиваемого слоя, измеренное в миллиметрах. Также при необходимости указывается схема подвода в зону обработки и отвода из зоны обработки.

После того, как на всех этапах были проведены описанные выше действия, система автоматически рассчитывает траектории. На рисунке 4.22 показаны сгенерированные траектории для выращивания цилиндра 200 мм.

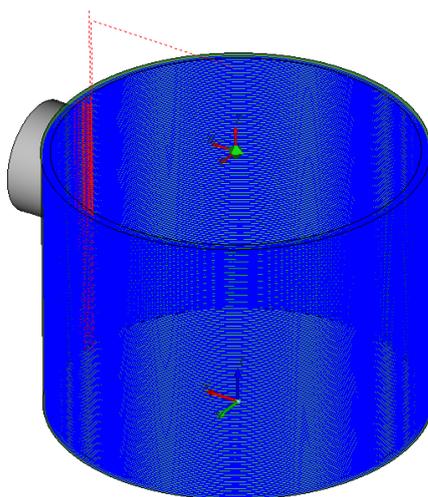
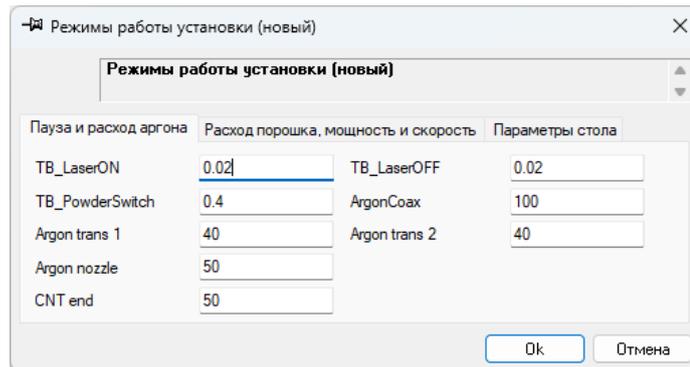


Рисунок 4.22 – Траектории для выращивания цилиндра

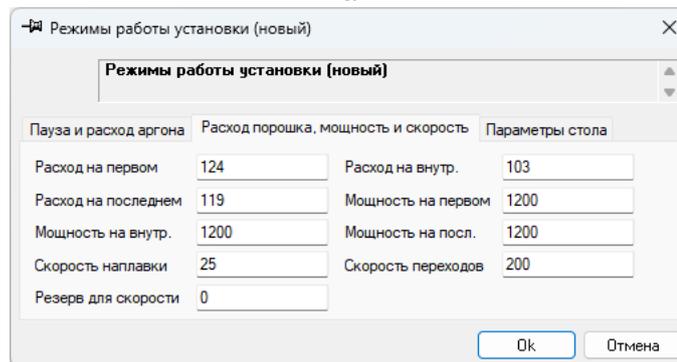
Далее вызывается окно, где указываются режимы работы установки. Данное окно состоит из трех вкладок.

- «Пауза и расход аргона», где указываются величины задержки перед включением и выключением лазера, а также задержка перед переключением подачи порошка в сопло или в бункер. Указывается CNT-интерполяция в конце рабочего хода и устанавливаются значения расходов аргона на транспортной и защитных магистралях (рисунок 4.23а).

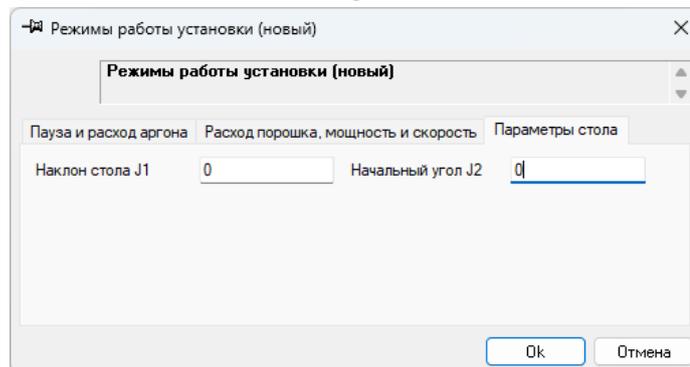
- «Расход порошка, мощность и скорость», где указываются расход порошка и мощность излучения на первом, внутренних и последнем валиках (рисунок 4.23б). Значения скоростей дублируются из операции создания траектории и переводятся из формата мм/мин в мм/с.
- «Параметры стола», где указываются начальные углы наклона и поворота позиционера (рисунок 4.23в).



а



б



в

а – вкладка «Пауза и расход аргона»,

б – вкладка «Расход порошка, мощность и скорость»,

в – вкладка «Параметры стола»

Рисунок 4.23 – Окно «Режимы работы установки»

Значения из первых двух вкладок с помощью постпроцессора заносятся в главную управляющую программу в виде регистров, которые контроллер робота через макросы распределяет по цифровым входам и выходам. Параметры стола необходимы для последующего перерасчета координат для обеспечения совместной работы робота и позиционера.

Аналогично происходит создание траекторий для малого наклонного цилиндра. При этом обработка данного элемента была разделена на две траектории: выращивание бобышки от стенки большого цилиндра до начала формирования цилиндрических траекторий и выращивание цилиндра с использованием упрощенной обработки (рисунок 4.24).

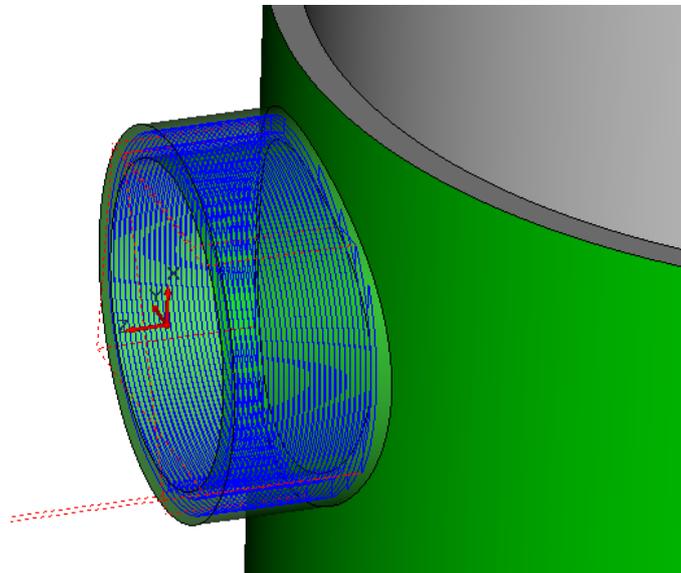


Рисунок 4.24 – Выращивание бокового цилиндра

После расчета всех траекторий генерируется промежуточный файл CLData, в котором команды и параметры заданы в универсальном виде. На рисунке 4.25 показан фрагмент CLData для выращивания большого цилиндра.

```

1 0 [1] Программа/ "test_vx", ДАТА - "31.07.2024 13:27 ", ОПЕРАЦИЯ - "005 ПРОГРАММНАЯ";
2 0 [2] Деталь/;
3 0 [3] Станок/"Robot 3x_2 (S)", фрезерный (3х);
4 2 [459] Функция пользователя/ 56(0,0.020,0.020,0.400,100.000,40.000,40.000,50.000,100.000,
5 3 [406] Начальная точка обработки/ 0.000 0.000 200.000;
6 4 [451] Безопасная Позиция/ Z 200.000;
7 5 [452] ПХХ/ модально Z 200.000;
8 6 [902] Зона/ "зона";
9 6 [405] Оси поворота/ Vx[1.000,0.000,-0.000] Vy[0.000,1.000,0.000] Vz[-0.000,0.000,1.000]
10 6 [9] Номер объекта/ 1;
11 6 [583] Системный комментарий/ 3 "Нарашивание цилиндра D=200мм" ;
12 6 [583] Системный комментарий/ 4 "#10 Сопло экструдера (D2.5)" ;
13 6 [350] Код фразы 350;
14 6 [35] Инструмент/ R 1.250 Позиция 10 Голова 1(не задано) Угол <90.0000;
15 6 [452] ПХХ/ Z 200.000;
16 6 [25] Холостой Ход;
17 6 [181] Ийти в Точку/ 0.000 0.000 200.000;
18 6 [181] Ийти в Точку/ 88.750 -2.000 200.000;
19 6 [181] Ийти в Точку/ 88.750 -2.000 0.000;
20 6 [23] Подача/ 1500.000 мм/мин;
21 6 [25] Холостой Ход;
22 6 [181] Ийти в Точку/ 98.750 -2.000 0.000;
23 6 [181] Ийти в Точку/ 98.750 -0.000 0.000;
24 6 [23] Подача/ 1500.000 мм/мин;
25 6 [183] Ийти в точку по Окружности/ 96.371 -21.546 0.000 -0.000 -0.002 98.750 <347.3973;
26 6 [183] Ийти в точку по Окружности/ 98.750 -0.000 0.000 0.026 -0.004 98.724 <12.6061;

```

Рисунок 4.25 – Фрагмент CLData для вырачивания большого цилиндра

Затем запускается постпроцессор, который конвертирует CLData в формат .ls, где прописаны все технологические команды, координаты и ориентация инструмента в каждой точке. Фрагмент УП по вырачиванию цилиндра  $\varnothing 200$  мм показан на рисунке 4.26.

```

1 : UTOOL_NUM=10 ;
2 : UFRAME_NUM=1 ;
3 : ! Start position (joint) = (J1 0.000,J2 5.573,J3 -64.523,J4
4 : ! Tool Number = 10 ;
5 : ! Program file name = P_unknow_nameN1.ls ;
6 : ;
7 : R[3] = R[80] ;
8 : L P[1] R[101]mm/sec CNT R[3] COORD ;
9 : ;
10 : Set Feeder Rate (R[71]) ;
11 : L P[2] R[101]mm/sec CNT R[3] COORD TB R[50]sec,DO[31] = ON ;
12 : R[3] = R[80] ;
13 : L P[3] R[101]mm/sec CNT R[3] COORD ;
14 : ;
15 : Set Feeder Rate (R[71]) ;
16 : L P[4] R[101]mm/sec CNT R[3] COORD TB R[50]sec,DO[31] = ON ;
17 : Set Laser Power (R[91]) ;
18 : C P[5] P[6] R[100]mm/sec CNT R[3] COORD TB R[32]sec,DO[1] = ON ;
19 : C P[7] P[8] R[100]mm/sec CNT R[3] COORD ;
20 : R[3] = R[80] ;
21 : L P[9] R[101]mm/sec CNT R[3] COORD TA R[33]sec,DO[1] = OFF ;
22 : ;
23 : Set Feeder Rate (R[72]) ;
24 : L P[10] R[101]mm/sec CNT R[3] COORD TB R[50]sec,DO[31] = ON ;
25 : R[3] = R[80] ;
26 : ;
27 : Set Feeder Rate (R[72]) ;
28 : L P[11] R[101]mm/sec CNT R[3] COORD TB R[50]sec,DO[31] = ON ;
29 : Set Laser Power (R[92]) ;
30 : C P[12] P[13] R[100]mm/sec CNT R[3] COORD TB R[32]sec,DO[1] = ON ;
31 : C P[14] P[15] R[100]mm/sec CNT R[3] COORD ;
32 : R[3] = R[80] ;
33 : L P[16] R[101]mm/sec CNT R[3] COORD TA R[33]sec,DO[1] = OFF ;
34 : ;
35 : Set Feeder Rate (R[71]) ;
36 : L P[17] R[101]mm/sec CNT R[3] COORD TB R[50]sec,DO[31] = ON ;
37 : R[3] = R[80] ;
38 : L P[18] R[101]mm/sec CNT R[3] COORD ;
39 : ;
40 : Set Feeder Rate (R[71]) ;
41 : L P[19] R[101]mm/sec CNT R[3] COORD TB R[50]sec,DO[31] = ON ;
42 : Set Laser Power (R[91]) ;
43 : C P[20] P[21] R[100]mm/sec CNT R[3] COORD TB R[32]sec,DO[1] = ON ;
44 : C P[22] P[23] R[100]mm/sec CNT R[3] COORD ;
45 : R[3] = R[80] ;
46 : L P[24] R[101]mm/sec CNT R[3] COORD TA R[33]sec,DO[1] = OFF ;

```

Рисунок 4.26 – Фрагмент управляющей программы

#### **Выводы по главе 4**

1. Разработаны модели формирования контуров и заполнения и генерации управляющих программ с учетом использования осей позиционера.
2. Сформулированы ограничения технологии прямого лазерного выращивания, позволяющие учитывать их при формировании траекторий многоосевой наплавки для роботизированных установок прямого лазерного выращивания. Ограничения, а также модели формирования слоёв и генерации управляющих программ адаптированы под их использование в САМ-системах. Разработано техническое задание и получен акт внедрения от ООО «Крона», разработчика CAD/CAM «ADEM».
3. Апробирован функционал САМ-модуля для создания траекторий выращивания для технологии ПЛВ.

## ГЛАВА 5 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЗАГОТОВОК КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ ГТД

Внедрение циклов в УП позволяет значительно сократить число точек и, как следствие, объем файла. В этом случае происходит копирование траекторий слоя на последующие слои до определенного значения. Важно отметить, что использование этого метода ведет к появлению ступенчатой внешней поверхности.

В качестве параметров выступают толщина слоя  $z_h$  и ограничение припуска (ширина ступени) по горизонтали  $\delta$  (рисунок 5.1).

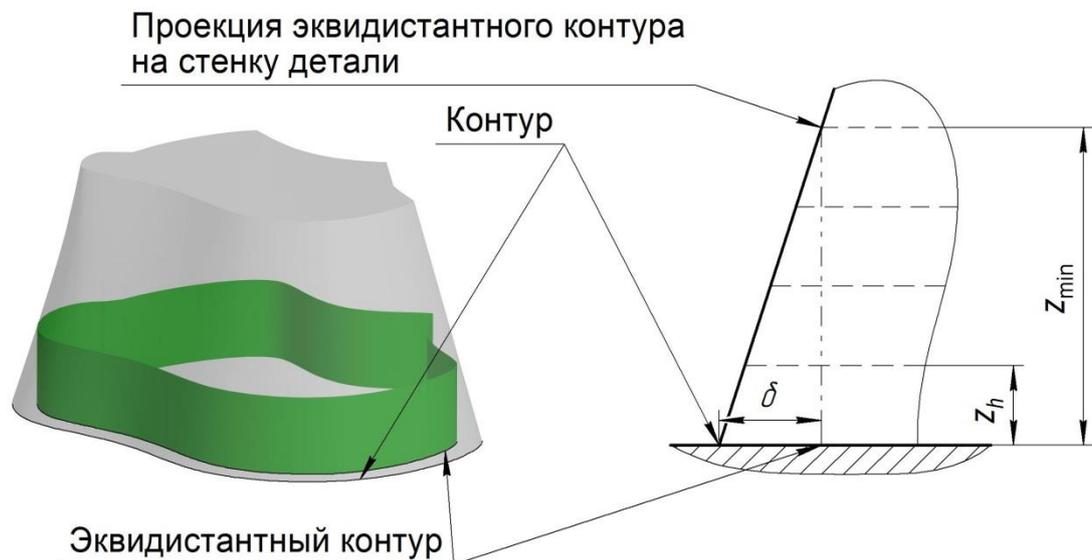


Рисунок 5.1 – Схема многоуровневого выращивания

Алгоритм формирования многоуровневого выращивания:

1. На текущем уровне построения по высоте определяется внешний контур детали  $L_i$  и контуры внутренних островов.
2. Строится эквидистантный контур, расположенный внутри внешнего контура и отстающий от него на величину  $\delta$ .
3. Эквидистантный контур проецируется на стенки детали  $Z = f(x, y)$ , где  $x, y$  – координаты эквидистантного контура.

4. Определяется минимальная высота проекции эквидистантного контура  $Z_{\min} = \min f(x, y)$ .

5. Рассчитывается заполнение исходного контура  $L_i$  – формируется траектория  $T_p$  движения наплавочной головки в слое.

6. Траектория  $T_p$  транслируется без изменений на высоту  $Z_{\min}$  с шагом построения  $Z_h$  в виде цикла или подпрограммы  $Z_{\min}/Z_h$  раз на высотах от  $Z_{\text{исходная}}$  до  $(Z_{\text{исходная}} + Z_{\min})$  включительно.

7. На высоте, соответствующей  $Z_{\min}$ , определяются новые внешние контуры  $L_{i+1}$  и контуры внутренних островов путем сечения детали плоскостью  $Z = (Z_{\text{исходная}} + Z_{\min})$ .

8. Повторяются пункты алгоритма 2...6. (рисунок 5.2).

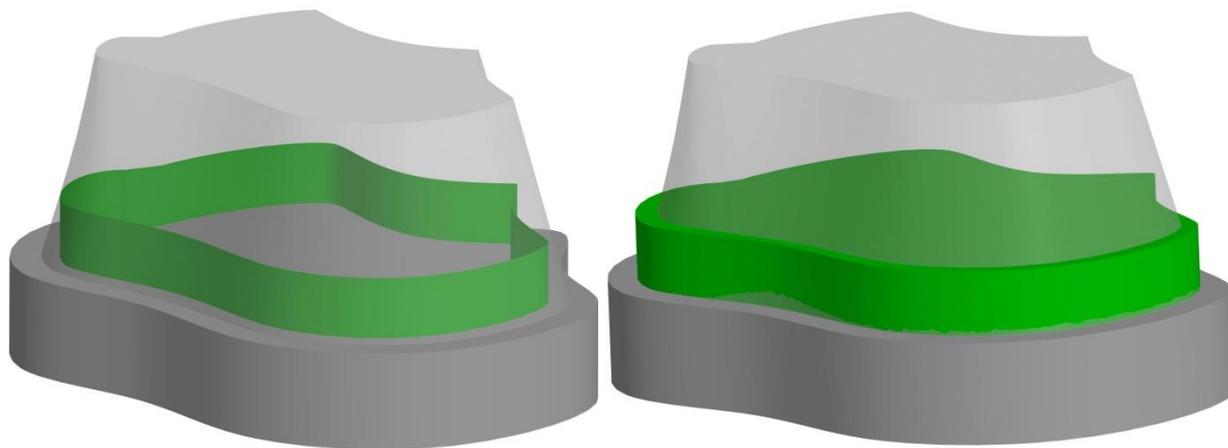


Рисунок 5.2 – Последующее выращивание детали

Данный вариант не зависит от способа заполнения слоя, однако эффективность использования метода зависит от угла наклона стенки к плоскости XY – чем больше угол, тем меньше высота  $Z_{\min}$  и, следовательно, ниже степень оптимизации управляющей программы.

Суммируя вышесказанное, методика прямого лазерного выращивания крупногабаритных заготовок корпусных деталей ГТД состоит из следующих пунктов:

1. Из файла CLData берётся информация о положении точек  $X_0$  и  $X_1$  траектории движения инструмента.

2. Определяется угол  $B_1$  наклона оси позиционера в точке  $X_1$ .
3. Координаты точки  $X_1$  из СК<sub>3</sub> переводятся в СК<sub>П</sub> при наклоне позиционера на угол  $B_1$ .
4. Определяются возможные радиусы поворота позиционера относительно оси  $Z$  в СК<sub>П</sub>.
5. Определяется возможность поворота позиционера на угол  $C_1$ .
6. Вычисляется возможный угол поворота позиционера.
7. Если поворот позиционера возможен, то после поворота рассчитываются координаты рабочей точки  $(X_C)_1$  в системе координат позиционера.
8. Производится пересчёт координат рабочей точки  $(X_C)_1$  из системы координат позиционера в систему координат заготовки.
9. Полученные координаты  $X_{01}(x_{01}, y_{01}, z_{01}, W_{01}, P_{01}, R_{01})$  вместе с углами  $B_1$  и  $C_1$  выводятся в выходной файл.
10. Исходя из значений  $x_{01}, y_{01}, z_{01}, W_{01}, P_{01}, R_{01}, B_1$  и  $C_1$ , решается обратная задача кинематики и определяются углы поворота звеньев робота  $(q_1, \dots, q_6)$  и позиционера  $(B_1, C_1)$ .
11. Повторяются пункты 1-10 для всех точек траекторий.
12. Применяется алгоритм многоуровневого выращивание для снижения объёма УП.
13. Формируется управляющая программа согласно схеме генерации УП с учётом использования позиционера.

Таким образом, методика прямого лазерного выращивания крупногабаритных заготовок корпусных деталей ГТД отличается от известных решений:

– применением математической модели формирования траекторий многоосевой наплавки, позволяющей адаптировать исходные траектории движения инструмента под роботизированные установки прямого лазерного выращивания,

– применением средств технологической подготовки, позволяющей получать управляющие программы для роботизированных установок ПЛВ, а также значения углов поворота звеньев робота и позиционера для симуляции движений роботизированной установки в САМ-системе

применением алгоритма многоуровневого выращивания, позволяющей снизить как объём УП, так и время их генерации, что снижает время технологической подготовки и, тем самым, трудоёмкость изготовления

Апробация разработанной в диссертационной работе методики была проведена на заготовке детали «Кольцо наружное ВНА», изготавливаемой из жаропрочного сплава на никелевой основе ВЖ159. 3D модель заготовки детали «Кольцо наружное ВНА» представлен на рисунке 5.3.

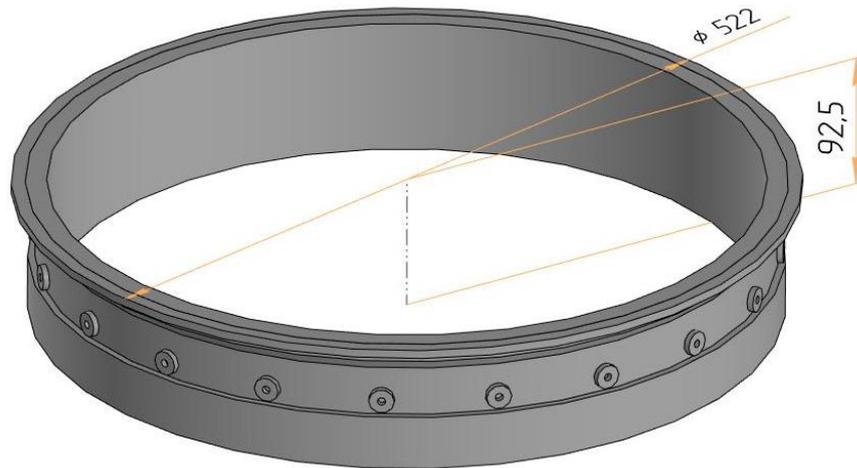


Рисунок 5.3 – 3D модель заготовки

Перед выращиванием заготовки были выращены технологические пробы для исследования микроструктуры с использованием алгоритма и без него. Технологические пробы представляют собой параллелепипеды с размерами  $50 \times 11 \times 15$  мм. Расположение технологических проб на позиционере показано на рисунке 5.4.

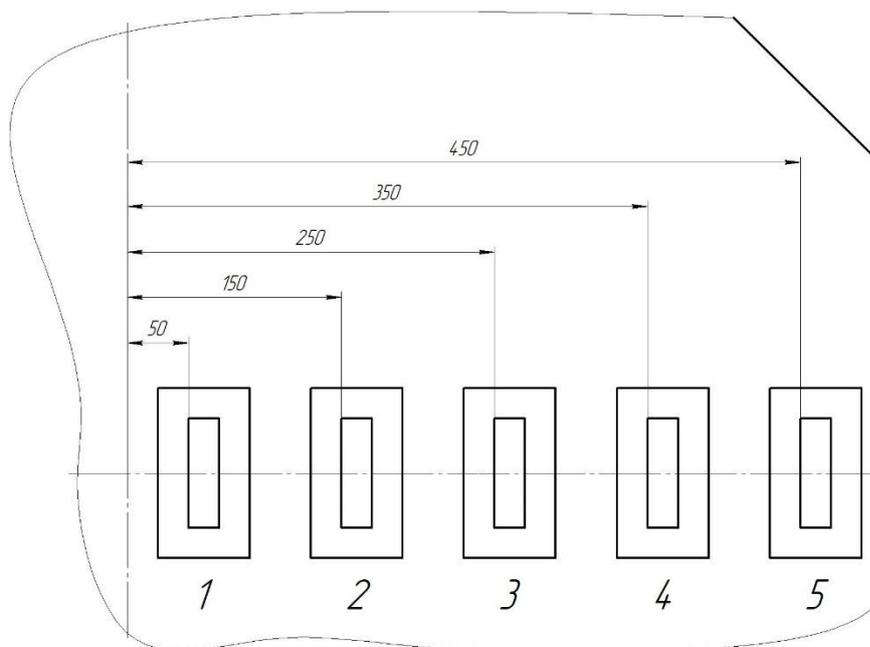


Рисунок 5.4 – Расположение технологических проб на позиционере

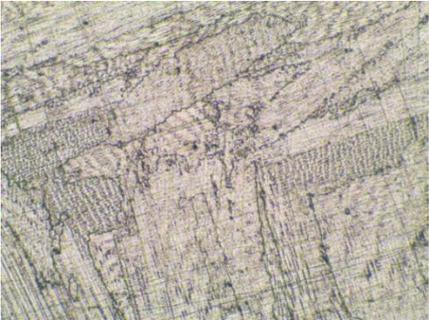
Данное исследование необходимо для проверки правильности пересчета координат на предмет влияния погрешности в результате работы математической модели, разработанного в главе 2. Возможными характерными дефектами при неправильной работе алгоритма могут быть несплавления между валиками либо перерастание образца в результате большого значения коэффициента перекрытия.

Технологические пробы выращивались на апробированном ранее режиме, параметры которого представлены в таблице 5.1. В таблице 5.2 показана макро- и микроструктура образцов .

Таблица 5.1 – Режим выращивания

Наименование параметра	Единицы измерения	Значение параметра
Мощность лазерного излучения	Вт	2000
Скорость выращивания	мм/с	25
Расход порошка	г/мин	23-33
Межпроходная пауза	с	60

Таблица 5.2 – Макро- и микроструктура образцов

Без методики	С использованием методики
Макроструктура	
	
Микроструктура, 166 крат	
	

При сравнении макро- и микроструктуры образцов указанные выше дефекты не были обнаружены, что говорит о корректной работе алгоритма при пересчете координат.

Для выращивания заготовки детали «Кольцо наружное ВНА» была предварительно создана технологическая модель, в которой осуществлялась декомпозиция на простые элементы. Для данных элементов была определена последовательность выращивания, нумерация которых показана на рисунке 5.5.

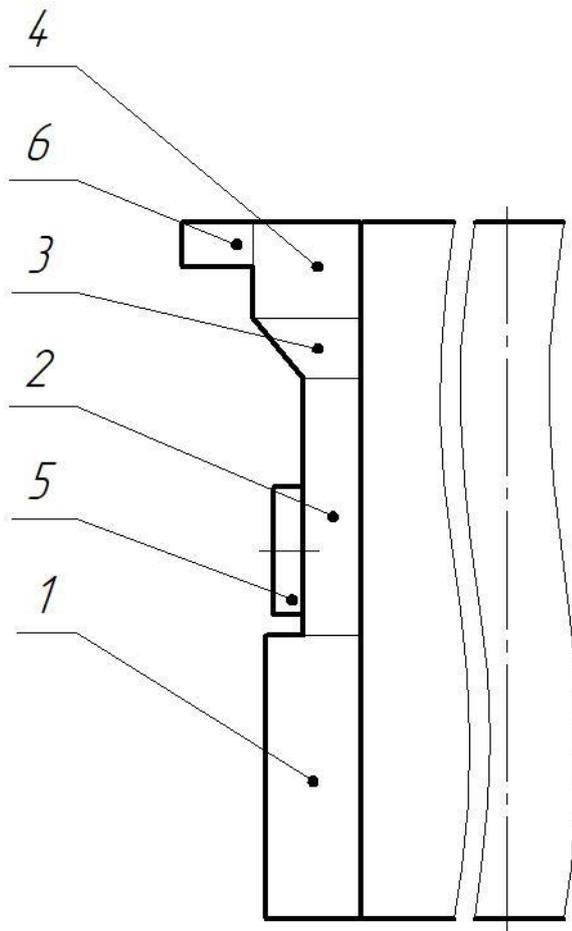


Рисунок 5.5 – Элементы заготовки детали «Кольцо наружное ВНА»

Первые четыре элемента представляют осесимметричные тела с прямоугольным либо с трапецидальным сечением, выращивание которых происходит с вертикальной ориентацией сопла за счет наклона и вращения позиционера. Затем происходит выращивание 20-ти элементов №5, при которых сопло наклоняется горизонтально. После этого, не меняя ориентацию инструмента, выращивается фланцевая часть №6.

Особое внимание уделялось при создании технологической модели для третьего элемента. Поскольку сечение элемента представляет собой трапецию, необходимо чередовать наклон инструмента относительно направления выращивания. Использование стандартных функций в этом случае неприменимо, поэтому данный элемент был построен в виде набора поверхностей, вдоль которых затем строятся траектории. На рисунке 5.6 показано поперечное сечение элемента №3 с построенными поверхностями.

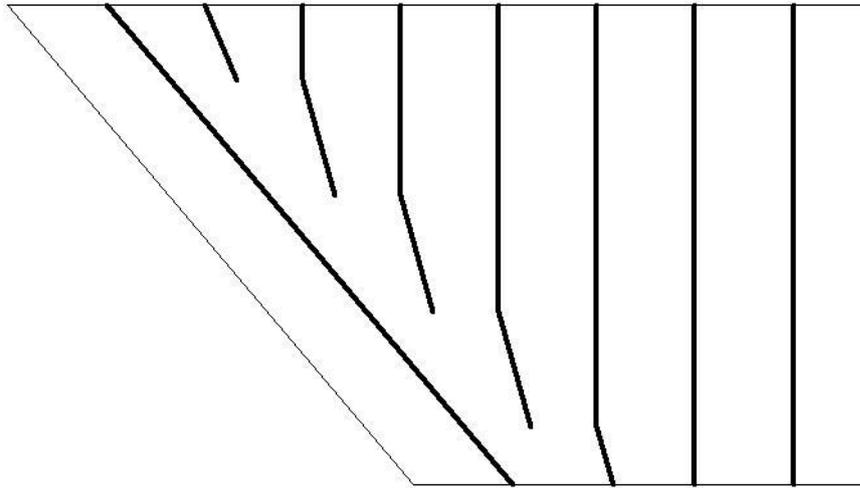


Рисунок 5.6 – Расположение поверхностей в технологической модели

Так как наклонные валики имеют уменьшенную площадь опоры, для ее увеличения наращиваемый слой начинался с внутренней стенки. В этом случае крайний наклонный валик имеет увеличенную площадь опоры. Если этого не делать, то для компенсации недостаточного количества наплавляемого материала необходимо увеличивать расход порошка, однако чрезмерное увеличение расхода снижает КЗП и приводит к загрязнению сопла с последующими остановками для его прочистки.

На рисунке 5.7 показан процесс выращивания фланцевой части заготовки детали «Кольцо наружное ВНА». Время печати составило 16 часов, масса заготовки – 13,7 кг, затрачено 21,7 кг МПК ВЖ159. Высокий расход порошка связан с большим количеством холостых ходов, во время которых подача порошка не прекращалась. Больше всего холостых ходов было при выращивании 20-ти бобышек. На рисунке 5.8 показана выращенная заготовка.

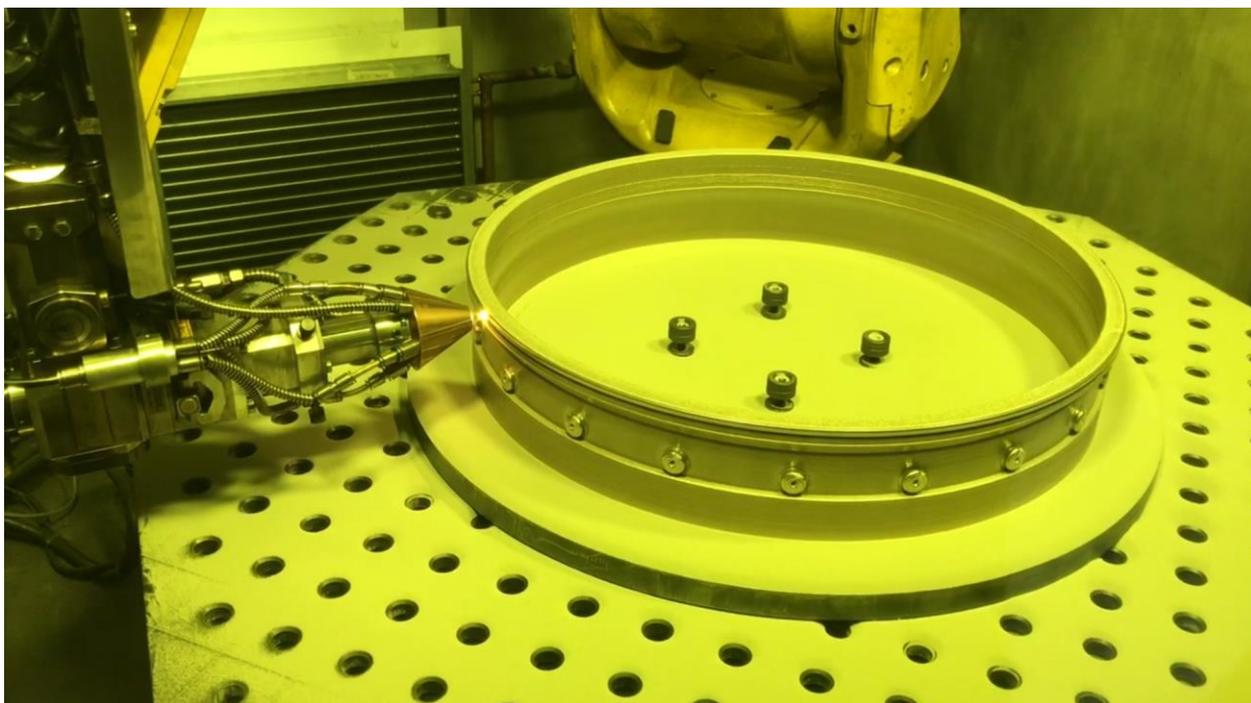


Рисунок 5.7 – Заготовка в процессе выращивания

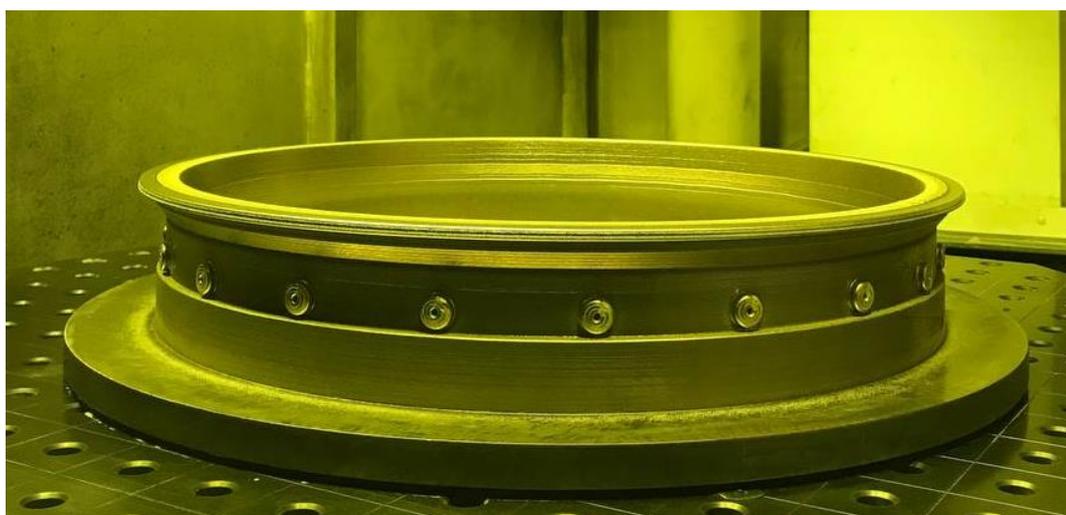


Рисунок 5.8 – Выращенная заготовка

С целью контроля геометрии заготовки она была отсканирована с помощью лазерного 3D сканера ScanForm L5. Результат наложения скана на 3D модель заготовки показан на рисунке 5.9. Все контролируемые размеры находятся в полях своих допусков, что свидетельствует о получении годной заготовки.

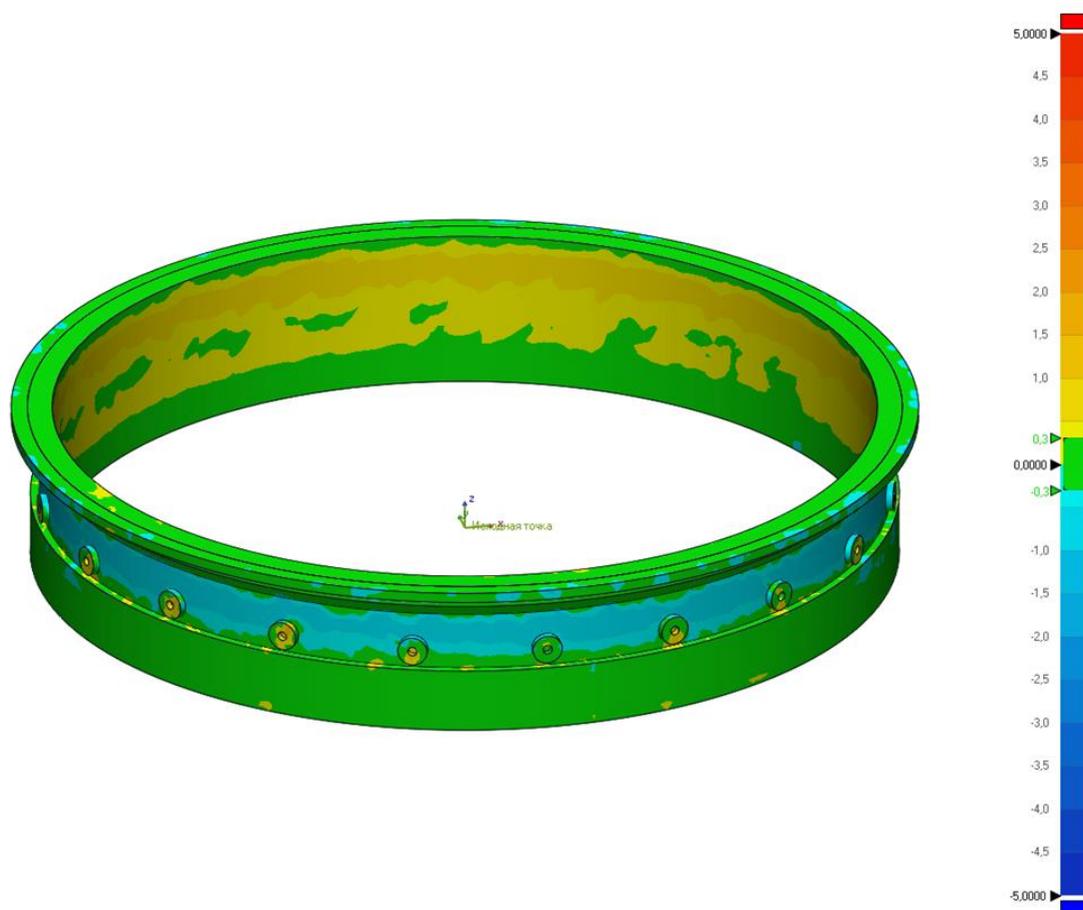


Рисунок 5.9 – Результат наложения скана заготовки

В таблице 5.3 представлено сравнение вариантов изготовления детали «Кольцо наружное ВНА» по традиционному технологическому процессу и по технологии ПЛВ без методики и с её использованием.

Таблица 5.3 – Сравнение вариантов изготовления детали «Кольцо наружное ВНА»

	Традиционный ТП	ТП ПЛВ без методики	ТП ПЛВ с методикой
Масса заготовки, кг	31,9	14,2	13,7
Трудоёмкость изготовления, н-ч	346,1	157,3	149,3
КИМ	0,19	0,44	0,45

Из таблицы видно, что применение технологии ПЛВ позволило снизить массу заготовки и трудоёмкость изготовления более чем в 2 раза. Применение разработанной методики позволило дополнительно сэкономить 0,5 кг металла за счёт повышения точности позиционирования, что дало возможность уменьшить припуск на обработку. Также методика обеспечила снижение трудоёмкости технологической подготовки за счёт:

- сокращения числа симуляций до 1 итерации;
- снижения времени генерации УП;
- снижения времени вспомогательных ходов.

### **Выводы по главе 5**

1. С помощью разработанного аддитивного блока САМ-модуля Компас-ADEM была разработана управляющая программа для выращивания заготовки детали «Кольцо наружное ВНА» с использованием алгоритма, разработанного во второй главе. В результате контроля геометрии не было выявлено отклонений размеров сверх допусков.

2. Разработана методика прямого лазерного выращивания крупногабаритных заготовок корпусных деталей ГТД, включающая оригинальный алгоритм многоуровневого выращивания, позволяющий снизить время генерации управляющих программ. Апробация алгоритма при выращивании заготовки детали «Кольцо наружное ВНА» показала, что время генерации сократилось на 84,8% и составило 89 секунд.

3. Разработанная методика прямого лазерного выращивания крупногабаритных заготовок корпусных деталей ГТД позволила сократить массу заготовки детали «Кольцо наружное ВНА» на 43% по сравнению с традиционным способом получения заготовки, состоящее из сборки двух отдельных кольцевых заготовок. Трудоёмкость получения детали сократилась более чем в 2 раза и составила 149,3 н-ч.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлено решение актуальной научно-технической задачи в области авиационного двигателестроения, направленной на повышение производительности труда и сокращение трудоёмкости при производстве ГТД за счёт разработки методики изготовления крупногабаритных осесимметричных заготовок корпусных деталей авиационных ГТД по технологии прямого лазерного выращивания.

1. Выполнен анализ проблемы получения крупногабаритных осесимметричных заготовок корпусных деталей ГТД с учётом назначения рационального припуска. Традиционной технологией получения крупногабаритных осесимметричных заготовок корпусных деталей ГТД является сборка раскатных колец, процесс получения которых сопровождается высокой трудоёмкостью и большим расходом материала ввиду большого количества напусков. Технология ПЛВ позволяет снизить трудоёмкость изготовления крупногабаритных осесимметричных заготовок корпусных деталей ГТД и повысить коэффициент использования материала за счёт снижения величины припуска и возможности получения формы заготовки, приближенной к форме детали. Установлено, что при замене традиционной технологии на технологию ПЛВ экономия материала возрастает в 1,2-3 раза.

2. Разработана математическая модель формирования траекторий многоосевой наплавки для формообразования заготовок деталей ГТД по технологии прямого лазерного выращивания на роботизированных установках с использованием двухосевого позиционера, позволяющая повысить точность позиционирования наплавочного инструмента. Проведённые эксперименты показали, что точность позиционирования при использовании модели составляет 0,14 мм, что на 70% точнее исходного способа позиционирования.

3. Разработаны средства технологической подготовки для создания управляющих программ для роботизированных установок прямого лазерного выращивания на базе математической модели формирования траекторий многоосевой наплавки крупногабаритных деталей авиационных ГТД. Средства технологической подготовки позволяют получать управляющие программы с возможностью формирования адаптивных траекторий и значения углов поворота звеньев робота и позиционера для симуляции движений в САМ-системе.

4. Сформулированы ограничения технологии прямого лазерного выращивания, позволяющие учитывать их при формировании траекторий многоосевой наплавки для роботизированных установок прямого лазерного выращивания. Ограничения, а также модели формирования слоёв и генерации управляющих программ адаптированы под их использование в САМ-системах. Разработано техническое задание и получен акт внедрения от ООО «Крона», разработчика CAD/CAM «ADEM».

5. Разработана методика прямого лазерного выращивания крупногабаритных заготовок корпусных деталей ГТД, включающая оригинальный алгоритм многоуровневого выращивания, позволяющий снизить время генерации управляющих программ. Апробация алгоритма при выращивании заготовки детали «Кольцо наружное ВНА» показала, что время генерации сократилось на 84,8% и составило 89 секунд.

6. Достигнута цель диссертационного исследования и решена важная отраслевая проблема повышения коэффициента использования материала и сокращения трудоёмкости изготовления крупногабаритных осесимметричных заготовок корпусных деталей ГТД по технологии прямого лазерного выращивания на роботизированных установках на основе разработки методики, обеспечивающей получение заготовок, близких по форме к готовым деталям, за счёт формирования рациональных траекторий наплавки. Разработанная методика прямого лазерного выращивания крупногабаритных заготовок корпусных деталей ГТД позволила сократить массу заготовки

детали «Кольцо наружное ВНА» на 43% по сравнению с традиционным способом получения заготовки, состоящее из сборки двух отдельных кольцевых заготовок. Трудоёмкость получения детали сократилась более, чем в 2 раза и составила 149,3 н-ч.

**Перспективы дальнейшей разработки темы.** Перспективным направлением является совершенствование управления параметрами качества заготовок, получаемых с помощью технологии прямого лазерного выращивания, с целью повышения стабильности технологического процесса изготовления деталей ГТД. В частности, в будущих работах планируется разработка системы автоматического управления технологическими параметрами в процессе прямого лазерного выращивания.

## Перечень сокращений и обозначений

- CAD – Computer aided design, система автоматизированного проектирования;
- CAM – Computer aided manufacturing, система автоматизированного производства;
- ДН-параметры – параметры Денавита-Хартенберга;
- EB-DED – electron beam direct energy deposition, выращивание с использованием электронного пучка;
- GTA-DED – gas tungsten arc direct energy deposition, выращивание с использованием неплавящегося электрода;
- GMA-DED – gas metal arc direct energy deposition, электродуговое выращивание плавящимся электродом;
- MIG – metal inert gas, сварка плавящимся электродом в защитной атмосфере
- TIG – tungsten inert gas welding, сварка неплавящимся электродом в защитной атмосфере
- PA-DED – plasma arc direct energy deposition, выращивание с использованием плазменного электрода;
- WAAM – wire-arc additive manufacturing, проволочно-дуговое аддитивное производство;
- АП – аддитивное производство;
- МПК – металлопорошковая композиция;
- НИОКР – научно-исследовательская и опытно-конструкторская работа;
- ОЗК – обратная задача кинематики;
- ПЗК – прямая задача кинематики;
- ПЛВ – прямое лазерное выращивание;
- ПО – программное обеспечение;
- РТИ – рабочая точка инструмента;
- РУПЛВ – роботизированная установка прямого лазерного выращивания;
- САПР – система автоматизированного проектирования;
- СК – система координат;

СЛС – селективное лазерное сплавление;

СП – скоординированная пара;

УП – управляющая программа;

УЧПУ – устройство ЧПУ;

ФМ – функциональная модель;

ЧПУ – числовое программное управление.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 57558-2017/ISO/ASTM 52900:2015 «Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 1» от 27.07.2017 № 752-ст // Стандартиформ. – 2020 г. – Дата введения – 01.12.2017 – 12 с
2. Тундайкин, К. О. Методы аддитивного производства прототипов и готовых изделий (обзор) / К. О. Тундайкин, И. И. Соколов // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2016. – № 8. – С. 44-48..
3. 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, № 2. – С. 48-64. – DOI 10.18287/2541-7533-2022-21-2-48-64.
4. Зленко М.А. Аддитивные технологии в машиностроении/ М.В. Нагайцев, В.М. Довбыш // пособие для инженеров. – М. ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ» 2015. 220 с
5. Turichin G.A., Somonov V.V., Babkin K.D., Zemlyakov E.V., Klimova O.G. High-speed direct laser deposition: technology, equipment and materials // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Current Problems and Solutions, 2016, Vol. 125 № 012009.
6. 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.
7. Архипов В. Е. и др. Технологические особенности газодинамического напыления покрытий //Вестник машиностроения. – 2015. – №. 9. – С. 64-69.
8. Мурадов И. Б. и др. Особенности создания сегнетокерамических покрытий газодинамическим напылением //Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. – 2012. – №. 3. – С. 69-72.

9. Богданович В. И. и др. Математическое моделирование процессов плавления порошка в технологии селективного лазерного сплавления //Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2017. – Т. 19. – №. 4-1. – С. 105-114.

10. Аддитивная технология гетерофазной порошковой лазерной металлургии / Г. А. Туричин, О. Г. Климова-Корсмик, Е. В. Земляков [и др.] // Технология легких сплавов. – 2016. – № 1. – С. 53-56. – EDN WTIOСJ.

11. 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.

12. Баевич Г. А., Мышковец В. Н., Максименко А. В. Особенности плавления присадки хрома в зависимости от формы импульса лазерного излучения в процессах сварки и наплавки //Автоматическая сварка. – 2015. – №. 2. – С. 28-31.

13. Электронно-лучевые аддитивные технологии (обзор литературных источников) / С.В. Варушкин, В.Я. Беленький, М.А. Ковтунович, Н.А. Колчанов, А.О. Печёнкин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение. Материаловедение. – 2024. – Т. 26, № 4. – С. 79–88. DOI: 10.15593/2224-9877/2024.4.08

14. Бакеев И. Ю. и др. Установка электронно-лучевого выращивания металлических изделий //Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2017. – Т. 20. – №. 3. – С. 76-78.

15. Совершенствование процесса объемной электродуговой наплавки сплава Св-АК5 / К. В. Никитин, Д. А. Дунаев, С. С. Жаткин [и др.] // Литейщик России. – 2024. – № 4. – С. 3-8. – EDN BBALOI.

16. Kelly, Kathryn & Thien, Austen & Saleeby, Kyle & Saldana, Dr. (2025). A novel approach to path planning related to the intersections of aluminum WAAM. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 137. 2579-2593. 10.1007/s00170-025-15285-5.

17. Болтрушевич А. Е. Повышение эффективности аддитивного электродугового процесса за счёт импульсного управления. – 2021.

18. Скобликов Я. П. Способы уменьшения порообразований при выращивании изделий электродуговым методом из алюминиевых сплавов // *Academy*. – 2021. – №. 1 (64). – С. 42-47.

19. Кузнецов М. А. и др. Имитационная модель электродугового послойного выращивания валика // *Транспортное машиностроение*. – 2019. – №. 11 (84). – С. 19-26.

20. Терехов В. С. Исследования структуры и свойств образцов из алюминиевого сплава, полученных прямым лазерным выращиванием из проволоки: выпускная квалификационная работа магистра: направление 22.04. 01 «Материаловедение и технологии материалов»; образовательная программа 22.04. 01\_10 «Материалы и технологические процессы аддитивного производства». – 2022.

21. Применимость САМ-систем в области аддитивных технологий на примере работы с электродуговым выращиванием и СПРУТКАМ / И. Д. Бородкин, З. И. Гимранов, М. А. Олейник, В. Г. Смелов // *Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета*. – 2025. – Т. 4, № 1(13). – С. 89-96. – DOI 10.52899/24141437\_2025\_01\_89.

22. Ольшанская Т. В. и др. Исследование влияния технологических приемов на формирование структуры и свойств при аддитивном выращивании изделий из хромоникелевых сталей аустенитного класса методами плазменной наплавки // *Электронно-лучевая сварка и смежные технологии*. – 2021. – С. 297-314.

23. Хакимов А. М., Жаткин С. С., Щедрин Е. Ю. Исследование структуры и свойств деталей из жаропрочных и нержавеющей сплавов,

полученных технологией прямого лазерного выращивания //Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2020. – Т. 22. – №. 2. – С. 59-66.

24. Сомонов В. В. Прямое лазерное выращивание изделий из порошковых материалов: принцип, оборудование и материалы //Технические науки в России и за рубежом. – 2016. – С. 34-38.

25. Панченко О. В., Курушкин Д. В., Попович А. А. Электродуговое выращивание: технические и экономические преимущества //Технический оппонент. – 2020. – №. 1. – С. 16-22.

26. Институт лазерных и сварочных технологий СПбГМТУ [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.ilwt-stu.ru> (дата обращения: 20.04.2024).

27. POM Group [Электронный ресурс]. – URL: [www.pomgroup.com](http://www.pomgroup.com) (дата обращения: 20.04.2024).

28. Optomec [Электронный ресурс]. – URL: [www.Optomec.com](http://www.Optomec.com) (дата обращения: 20.04.2024).

29. Sciaky [Электронный ресурс]. – URL: [www.Sciaky.com](http://www.Sciaky.com) (дата обращения: 20.04.2024).

30. Industrial Laser Solutions and Materials Expertise [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.irepa-laser.com/en/> (дата обращения: 20.04.2024)

31. DMG MORI Россия [Электронный ресурс]. – URL: <https://ru.dmgmori.com> (дата обращения: 20.04.2024).

32. TRUMPF GmbH [Электронный ресурс]. – URL: [https://www.trumpf.com/ru\\_RU/](https://www.trumpf.com/ru_RU/) (дата обращения: 20.04.2024).

33. InssTek DMT [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.insstek.com> (дата обращения: 20.04.2024).

34. Mazak | Официальный сайт [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.mazak.ru> (дата обращения: 20.04.2024).

35. Аддитивные технологии [Электронный ресурс]. – URL: [https://ilwt-stu.ru/research/additive\\_technologies/](https://ilwt-stu.ru/research/additive_technologies/) (дата обращения: 20.04.2024).

36. Sutherland I. E. Sketch pad a man-machine graphical communication system //Proceedings of the SHARE design automation workshop. – 1964. – C. 6.329-6.346.
37. P. Bezier, Mathematical and practical possibilities of unisurf, in: R.E. Barnhill, R. F. Riesenfeld (Eds.), Computer Aided Geometric Design, Academic Press, 1974, pp. 127–152.
38. H.K. Tonshoff, J. Hernandez-Camacho, Die manufacturing by 5- and 3-axes milling: influence of surface shape on cutting conditions, J. Mech. Work. Technol. 20 (1989) 105–119.
39. Esprit CAM. Accelerate Production Milling. In: Accelerate Production Milling [Internet]. [cited 21 Dec 2021]. Available: <https://www.espritam.com/info/upgrade-to-the-new-esprit>.
40. Autodesk. Expert 3- and 5-axis CAM. In: Expert 3- and 5-axis CAM [Internet]. [cited 21 Dec 2021]. Available: <https://www.autodesk.com/products/powermill/features>.
41. OpenMind. HyperMILL® end-to-end CAM solution is now even more powerful. In: HyperMILL® end-to-end CAM solution is now even more powerful [Internet]. [cited 21 Dec 2021]. Available: <https://www.openmind-tech.com/en-us/news/detail/hypermill-2022-1.html>.
42. MasterCam. 3D High Speed Dynamic OptiRough Available for Mill and Router Product Level. In: 3D High Speed Dynamic OptiRough Available for Mill and Router Product Level [Internet]. [cited 21 Dec 2021]. Available: [https://whatsnew.mastercam.com/en-us/Content/Milling/Mill\\_Opti.htm](https://whatsnew.mastercam.com/en-us/Content/Milling/Mill_Opti.htm).
43. L. Ren, T. Sparks, J. Ruan, F. Liou, Integrated process planning for a multiaxis hybrid manufacturing system, J. Manuf. Sci. Eng. (2010) 132, <https://doi.org/10.1115/1.4001122>.
44. T. Vaneker, A. Bernard, G. Moroni, I. Gibson, Y. Zhang, Design for additive manufacturing: framework and methodology, CIRP Ann. 69 (2020) 578–599.

45. W. Fu, A.A. Eftekharian, M.I. Campbell, Automated manufacturing planning approach based on volume decomposition and graph-grammars, *J. Comput. Inf. Sci. Eng.* (2013) 13, <https://doi.org/10.1115/1.4023860>.
46. F. Kaji, A.N. Jinoop, M. Zimny, G. Frikel, K. Tam, E. Toyserkani, Process planning for additive manufacturing of geometries with variable overhang angles using a robotic laser directed energy deposition system, *Addit. Manuf. Lett.* 2 (2022), 100035.
47. L. Yuan, Z. Pan, J. Polden, D. Ding, S. van Duin, H. Li, Integration of a multi- directional wire arc additive manufacturing system with an automated process planning algorithm, *J. Ind. Inf. Integr.* 26 (2022), 100265.
48. X. Xiao, S. Joshi, Process planning for five-axis support free additive manufacturing, *Addit. Manuf.* 36 (2020), 101569.
49. X. Xiao , S. Joshi , Decomposition and Sequencing for a 5-Axis Hybrid Manufacturing Process. ASME 2020 15th International Manufacturing Science and Engineering Conference. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection; 2021. doi:10.1115/MSEC2020–8385.
50. A. Elser, M. Konigs, A. Verl, M. Servos, On achieving accuracy and efficiency in Additive Manufacturing: requirements on a hybrid CAM system, *Procedia CIRP* 72 (2018) 1512–1517.
51. T. Feldhausen, N. Raghavan, K. Saleeby, L. Love, T. Kurfess, Mechanical properties and microstructure of 316L stainless steel produced by hybrid manufacturing, *J. Mater. Process Technol.* 290 (2021), 116970.
52. R.W. Hedrick, R.J. Urbanic, C.G. Burford, Development considerations for an additive manufacturing CAM system, *IFAC-Pap.* 48 (2015) 2327–2332.
53. A. Roschli, A. Messing, M. Borish, B.K. Post, L.J. Love, ORNL slicer 2: a novel approach for additive manufacturing tool path planning, *Solid Free. Fabr. Symp.* (2017) 7.
54. N. Nadammal, T. Mishurova, T. Fritsch, I. Serrano-Munoz, A. Kromm, C. Haberland, et al., Critical role of scan strategies on the development of

microstructure, texture, and residual stresses during laser powder bed fusion additive manufacturing, *Addit. Manuf.* *Addit. Manuf.* 38 (2021), 101792.

55. M. Molitch-Hou, 1 - Overview of additive manufacturing process, in: J. Zhang, Y.- G. Jung (Eds.), *Additive Manufacturing*, Butterworth-Heinemann, 2018, pp. 1–38.

56. M. Ueda , D. Carter , K. Yamazaki , Y. Kakinuma , Intelligent process planning and control of DED (directed energy deposition) for rapid manufacturing. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing.* 2020;14.

57. J. Xu, X. Gu, D. Ding, Z. Pan, K. Chen, A review of slicing methods for directed energy deposition based additive manufacturing, *Rapid Prototyp. J.* 24 (2018) 1012–1025.

58. A. Plotkowski, J. Ferguson, B. Stump, W. Halsey, V. Paquit, C. Joslin, et al., A stochastic scan strategy for grain structure control in complex geometries using electron beam powder bed fusion, *Addit. Manuf.* 46 (2021), 102092.

59. J. Ertveldt , Z. Jardon , M. Hinderdael , P. Guillaume , The Effect Of Weave In Directed Energy Deposition of Thin Walled Geometries. 40th congress on applications of laser & electro-optics. *cris.vub.be*; 2021. Available: [https://cris.vub.be/ws/files/77365518/ICALEO2021\\_Ertveldt\\_v1.pdf](https://cris.vub.be/ws/files/77365518/ICALEO2021_Ertveldt_v1.pdf).

60. B. Lauwers, P. Dejonghe, J.P. Kruth, Optimal and collision free tool posture in five-axis machining through the tight integration of tool path generation and machine simulation, *Comput. Aided Des. Appl.* 35 (2003) 421–432.

61. J. Zha, J. Liang, Y. Li, H. Zhang, Y. Chen, Large cutting depth and layered milling of titanium alloy thin-walled parts, *Materials* (2020) 13, <https://doi.org/10.3390/ma13071499>.

62. L.T. Tunc, E. Budak, S. Bilgen, M. Zatarain, Process simulation integrated tool axis selection for 5-axis tool path generation, *CIRP Ann.* 65 (2016) 381–384.

63. J. Chen, P. Hu, H. Zhou, J. Yang, J. Xie, Y. Jiang, et al., Toward intelligent machine tool, *Proc. Est. Acad. Sci. Eng.* 5 (2019) 679–690.

64. W. Hui , Five-Axis Numerical Control Processing Application and Surface Quality Control of HyperMILL-Based Mobile Phone Mold Cavity. 2014 Fifth International Conference on Intelligent Systems Design and Engineering Applications. [ieeexplore.ieee.org](http://ieeexplore.ieee.org); 2014. pp. 497–502.

65. X. Zhang, W. Shen, V. Suresh, J. Hamilton, L.-H. Yeh, X. Jiang, et al., In situ monitoring of direct energy deposition via structured light system and its application in remanufacturing industry, *Int J. Adv. Manuf. Technol.* 116 (2021) 959–974.

66. I. Garmendia, J. Pujana, A. Lamikiz, M. Madarieta, J. Leunda, Structured light- based height control for laser metal deposition, *J. Manuf. Process* 42 (2019) 20–27.

67. I. Garmendia, J. Flores, M. Madarieta, A. Lamikiz, L.G. Uriarte, C. Soriano, Geometrical control of DED processes based on 3D scanning applied to the manufacture of complex parts, *Procedia CIRP* 94 (2020) 425–429.

68. TMAC Tool Monitoring Adaptive Control. In: TMAC Tool Monitoring Adaptive Control [Internet]. [cited 10 Apr 2022]. Available: [www.caroneng.com/products/tmac](http://www.caroneng.com/products/tmac).

69. OpenMind. Networking and Synchronization with the CNC Machine Tool. In: Networking and Synchronization with the CNC Machine Tool [Internet]. [cited 21 Dec 2021]. Available: <https://www.openmind-tech.com/en-us/cam/hypermill-virtual-machining/hypermill-connected-machining.html>.

70. Авсиевич А. В., Колтыгин Д. С., Седельников И. А. Аппаратно-программный комплекс для управления робототехническими комплексами //Вестник СамГУПС. – 2021. – №. 1. – С. 91-97.

71. Родионов В. В., Филиппов С. И., Варабин Д. А. Унифицированная система управления робототехническими комплексами //Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2018. – №. 1 (195). – С. 128-140.

72. Норсеев С. А., Багаев Д. В. Обзор алгоритмов группового управления робототехническими комплексами //Электротехнические системы и комплексы. – 2013. – №. 21. – С. 137-145.

73. Архипов М., Вартанов М., Мищенко Р. Промышленные роботы: управление манипуляционными роботами 2-е изд., испр. и доп. Учебное пособие для вузов. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва : Издательство Юрайт, 2020 – 170 с. – (Высшее образование). – Текст : непосредственный.

74. Булгаков А., Воробьев В. Промышленные роботы. Кинематика, динамика, контроль и управление. – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2011. – 488 с.: ил.

75. Каменев С. В. Методика анализа статической жесткости станка с учетом конфигурации его рабочего пространства //Машиностроение и инженерное образование. – 2008. – №. 1. – С. 12-21.

76. Кузнецова С. В., Кабаева О. Н., Пантелеев Е. Ю. Анализ рабочего пространства робота с замкнутой кинематической цепью //Наука и современность. – 2011. – №. 10-2. – С. 52-56.

77. Алейников Ю. Г. Методика определения рабочего пространства опоры шагающей машины //Международный технико-экономический журнал. – 2013. – №. 1. – С. 117-119.

78. Олейник, М. А. Кинематическая оптимизация технологии прямого лазерного выращивания для осесимметричных заготовок / М. А. Олейник // Всероссийский научно-технический форум по двигателям и энергетическим установкам имени Н.Д. Кузнецова : сборник докладов всероссийского научно-технического форума, Самара, 10–11 октября 2024 года. – Самара: Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 2024. – С. 206-208.

79. Михайлова У. В. и др. Анализ систем управления роботами и методов их программирования //Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2014. – Т. 2. – №. 1. – С. 158.

80. Denavit, J. and Hartenberg, R. 1951. A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices. *ASME Journal of Applied Mechanics*, v22, 215-221
81. Dantam, N.T. (2020) Robust and efficient forward, differential, and inverse kinematics using dual quaternions. *The International Journal of Robotics Research*. 4(40). pp. 1–21. DOI: 10.1177/0278364920931948
82. Chen, L., Zielinska, T., Wang, J. & Ge, W. (2020) Solution of an inverse kinematics problem using dual quaternions. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*. 30(2). pp. 351–361. DOI: 10.34768/amcs-2020-0027
83. Zhao, Z., Wang, T. & Wang, D. (2017) Inverse kinematic analysis of the general 6R serial manipulators based on unit dual quaternion and Dixon resultant. *Proceedings 2017 Chinese Automation Congress (CAC)*. pp. 2646–2650.
84. Adrian-Vasile Duka, Neural Network based Inverse Kinematics Solution for Trajectory Tracking of a Robotic Arm, *Procedia Technology*, Volume 12, 2014, Pages 20-27, ISSN 2212-0173, <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.12.451>
85. Братчиков С. А., Абрамова Е. А., Федосов Ю. В. Решение обратной задачи кинематики манипулятора // *Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика*. – 2021. – №. 56. – С. 4-11.
86. Математическая модель кинематики промышленного робота, оснащенного двухосевым позиционером / М. А. Олейник, А. И. Хаймович, А. В. Балякин, Е. Ю. Щедрин // *Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета*. – 2021. – Т. 25, № 1(91). – С. 77-84.
87. Paul, R.P., Zhang, H. (1986). Computationally Efficient Kinematics for Manipulators with Spherical Wrists Based on the Homogeneous Transformation Representation. *The International Journal of Robotics Research*, 5, 32 - 44.
88. 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 др.] // Вестник Московского авиационного института. – 2022. – Т. 29, № 4. – С. 243-255. – DOI 10.34759/vst-2022-4-243-255.

89. Development of a calibration technique of a finite element model for calculating compensation of deformations from the action of residual stresses in additive manufacturing / M. Oleynik, A. Balyakin, A. Khaimovich, E. Zlobin // E3S Web of Conferences, Voronezh, 09–13 октября 2023 года. Vol. 458. – Voronezh: EDP Sciences, 2023. – P. 02023. – DOI 10.1051/e3sconf/202345802023.

90. 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. 215-225.

91. 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".

92. Open Mind [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.openmind-tech.com/ru/cam/hypermill/> (дата обращения: 15.07.2023).

93. Вильданов, А. М. Исследование особенностей формирования макродефектов объемной лазерной наплавки и разработка метода получения бездефектных наплавленных слоев : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Вильданов Артур Маратович, 2023. – 129 с. – EDN ZUEEAU.

94. Amirjan M., Khodabandeh M. Direct metal deposition of IN625 on IN738LC superalloy: microstructure and crack analysis // Applied Physics A. – 2021. – Т. 127. – №. 5. – С. 305.

95. ГОСТ Р 57586-2017 «Изделия, полученные методом аддитивных технологических процессов. Общие требования» от 09.08.2017 № 842-ст // Стандартиформ. – 2017 г. – Дата введения – 01.12.2017 – 8 с.

## Приложение А Свидетельство о государственной регистрации базы данных

№ 2024620533

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации базы данных

№ 2024620533

**Геометрические размеры и микроструктура образцов из сплава ЭП648, полученных прямым лазерным выращиванием**

Правообладатель: *федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П.Королева" (Самарский университет) (RU)*

Авторы: *Балякин Андрей Владимирович (RU), Кудряшова Мария Олеговна (RU), Олейник Максим Андреевич (RU), Малютин Артем Александрович (RU)*



Заявка № 2023623915

Дата поступления 14 ноября 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре баз данных 02 февраля 2024 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов