

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

**«МОСКОВСКИЙ АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ (МАДИ)
ПРИВОЛЖСКИЙ ИНСТИТУТ (ФИЛИАЛ) МАДИ**

АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Методические указания
для выполнения курсовой работы
для студентов специальности 23.05.01 Наземные
транспортно-технологические средства

Чебоксары, 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. 1. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ.....	6
2. 2. КРИТЕРИИ И НОРМЫ ОЦЕНКИ КУРСОВОЙ РАБОТЫ.....	20
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	22
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	23

ВВЕДЕНИЕ

Курсовая работа предполагает приобретение и закрепление знаний по основам аддитивного производства: методам прямого лазерного нанесения, селективного лазерного плавления и др. Курс «Аддитивные технологии в машиностроении» по специальности 23.05.01 Наземные транспортно-технологические средства является для студентов в период обучения предметом, позволяющим в комплексе рассмотреть технологический процесс изготовления машиностроительной продукции аддитивными методами производства.

Пособие предназначено для обеспечения усвоения студентами учебного материала по дисциплине «Аддитивные технологии в машиностроении» по специальности 23.05.01 Наземные транспортно-технологические средства. Пособие может быть использовано при самостоятельной работе студентов над курсовым проектом.

Целью освоения дисциплины «Аддитивные технологии в машиностроении» является формирование у студентов знаний по проектированию типовых и групповых технологических процессов на основе применения гибких автоматизированных систем с использованием модульного принципа описания машины как объекта машиностроительного производства.

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

знать:

- особенности перспективных технологий нового поколения;
- особенности гибкого автоматизированного производства;
- метод групповой обработки деталей машин;
- перспективные технологии изготовления разных групп деталей машин в автоматизированном машиностроении;

– модульный принцип описания машин как технической системы;

уметь:

- использовать источники информации при самостоятельной работе по освоению разделов и тем дисциплины;

– обеспечивать техническое оснащение рабочих мест автоматизированным оборудованием с числовым программным управлением и гибкими производственными системами (ГПС);

– применять современные методы для разработки малоотходных, энергосберегающих и экологически чистых машиностроительных технологий;

– подготавливать исходные данные для выбора и обоснования научно-технических и организационных решений при проектировании перспективных технологий;

– разрабатывать типовые и групповые технологические процессы изготовления деталей машин в автоматизированном машиностроении;

владеть:

- навыками проектирования типовых и групповых технологических процессов изготовления деталей машин в автоматизированном производстве;
- навыками применения модульного принципа описания машин как технической системы;
- навыками разработки технологической документации при внедрении групповой технологии изготовления деталей машин в автоматизированном машиностроительном производстве;
- навыками проектирования комплексной детали с созданием модулей поверхностей и комплексной заготовки.

1. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Цели и задачи

Курсовая работа предусматривает следующие задания:

- 1) составление чертежа и 3D-модели изделия в соответствии с заданием;
- 2) выбор способов аддитивного производства заданного изделия;
- 3) составление технологии изготовления изделия с обоснованием выбора заготовки, обеспечивающей наименьший припуск, а также 3D-принтера и инструмента;
- 4) назначение методов контроля.

Для выполнения курсовой работы деталь либо назначается преподавателем, либо принимается деталь, имеющаяся для выполнения дипломного проектирования.

Курсовая работа должна содержать пояснительную записку (формат А4) объемом до 25–30 страниц.

Общие требования к оформлению

Порядок выполнения. Курсовая работа рекомендуется выполнять в следующей последовательности:

- 1) тщательно ознакомиться с заданием и провести анализ особенностей 3D-прототипирования изделий, а также условий их изготовления;
- 2) сделать литературный обзор с целью выбора наиболее эффективных способов изготовления заготовки и изделия;
- 3) разработать технологии изготовления заготовки и изделия с выбором оборудования и инструмента;
- 4) оформить пояснительную записку.

Порядок оформления. Курсовая работа оформляется в виде сброшюрованной пояснительной записки, выполненной на листах писчей бумаги формата А4 (297 x 210).

Пример оформления титульного листа приведен в приложении А.

Чертежи стандартных изделий выполняются в полном соответствии со стандартами ЕСКД с указанием всех размеров, предельных отклонений и технических требований, необходимых при курсовом проектировании.

Обозначение чертежа, проставляемое в графе 2 основной надписи, составляется по следующей схеме:

КР.НТТС.ПСО-24.2024.ВО,

где КР – курсовая работа;

НТТС – шифр специальности ;

ПСО-24 – учебная группа;

2024 – учебный год выполнения курсовой работы;

ВО – шифр документа (СХ – схема, НТ – наладка технологическая, ВО – вид общий, СБ – сборочный чертеж и т. п.).

В основных надписях листов пояснительной записки проставляется это же обозначение (соответствующее номеру части).

Дополнительные графы основной надписи на чертежах, располагающиеся на полях и в верхней части формата, в учебном курсовом проекте допускается не выполнять.

Текст записки – рукописный или машинописный, выполняется на одной стороне листа. Каждый раздел начинается с новой страницы. Эскизы и схемы представляются на отдельных листах вслед за страницей, на которой находится ссылка. Нумерация страниц – сквозная, начиная с первой страницы текста. При этом на титульном листе номер страницы не проставляется.

Содержание пояснительной записки. Пояснительная записка включает следующие основные разделы:

1) задание – описывается задание по курсовой работе и приводится эскиз изделия;

2) введение – описывается назначение изделия;

3) технологический процесс изготовления заготовки, включая 3D-печать и финишную механическую обработку, для чего необходимо:

а) перечислить все возможные способы изготовления заготовки методами аддитивного производства;

б) выбрать из перечисленных способов наиболее эффективный, обеспечивающий высокую производительность, наименьшие затраты материалов, энергии, оборудования и т. д.;

в) использовать один из методов аддитивного производства, включая перечень всех операций и их схемы, оборудование для аддитивного производства, инструмент на каждой операции и методы контроля;

4) технологический процесс аддитивного производства изделия:

а) перечислить все возможные способы изготовления изделия;

б) из перечисленных способов выбрать наиболее эффективный, который обеспечивает высокую производительность, наименьшие затраты материалов, энергии, т. д.;

в) разработать данный процесс выбранным способом, включая перечень всех операций и их схемы, применяемое оборудование и инструмент, режимы обработки и методы контроля.

Календарный план выполнения работы. В соответствии с указанным преподавателем сроком выполнения курсовой работы студент составляет его рабочий календарный план. Составление календарного плана должно быть выполнено в течение недели после выдачи задания. Необходимым условием выполнения курсовой работы является систематическое посещение консультационных занятий по расписанию, указанному преподавателем. Выполнение работы заканчивается его защитой. Результат защиты выставляется в зачетке студента и учебных ведомостях. Студент, не защитивший курсовую работу в указанный преподавателем срок, не допускается к сдаче зачета или экзамена по данному курсу

Рекомендации по последовательности действий при выполнении курсовой работы

Основные этапы проектирования техпроцесса производства изделия аддитивными технологиями на примере детали «Ступица» (приложения Б, В, Г, Д):

1. Анализ чертежа изделия с точки зрения технологичности. Выбор оборудования для аддитивного производства (3D-принтер на базе ЧПУ управления или роботизированный комплекс) и способа 3D-печати (селективное лазерное плавление или прямое лазерное нанесение материала из порошка или проволоки). Разработка технологических переходов 3D-печати.

2. Разработка чертежа изделия с применением CAD/CAM системы. Расчет объемов металла, размеров и массы исходной заготовки.

3. Конструирование изделия.

4. Выбор режимов печати, мощности лазерного излучения, расхода защитного и подающего газов, марки и массы металлического порошка, расхода электроэнергии и т. д.

5. Разработка указаний о завершающих операциях (термообработка, очистка, мехобработка, методы контроля), выбор вспомогательного оборудования.

6. Составление технологической карты.

7. Оценка технико-экономических показателей техпроцесса.

Выбор процесса изготовления изделия

При выборе технологии получения заготовки, оценивая целесообразность выбора трудового процесса изготовления объекта, ступицу, а также экономическую рентабельность оборудования и порошкового материала, можно сделать вывод, что технология SLM несомненно подходит для «выращивания» данной модели. С помощью этого метода, применив специальную технологию, можно, используя один тип порошка, напечатать изделие с поддержками, которые впоследствии смогут легко удалиться.

Преимущества SLM-технологии:

1) высокая точность изготовления;

2) высокое качество поверхностей, механическая доработка практически не требуется;

3) широкий спектр используемых материалов, возможность изготовления функциональных прототипов;

4) при изготовлении прототипа не требуется построения поддерживающих структур, возможно изготовление деталей со сложной геометрией, позволяющей создавать высокопрочные элементы конструкций, недостижимые для традиционных механических методов изготовления и обработки (фрезеровки, резки и т. д.).

Установка SLM

SLM 125HL – компактная установка селективного лазерного плавления. Применяется для единичного и мелкосерийного производства сложных изделий из специальных металлических порошков: нержавеющей и инструментальных сталей, алюминиевых и титановых сплавов, инконелей, кобальт-хрома. Также используется при отработке режимов сплавления с целью получения оптимальных физико-механических свойств изделий. Установка оснащена системой пожаро- и взрывобезопасности. Процесс построения изделий полностью автоматизирован и не требует присутствия оператора после запуска машины.

Технические характеристики:

- Технология печати SLM
- Размер рабочей камеры (ДШВ, мм).....125 × 125 × 75
- Параметры печати:
 - практическая толщина слоя, мкм.....20 – 75 мкм
 - скорость построения, см³/ч.....105
 - минимальный размер элемента, мкм.....150
 - операционный фокус луча, мкм.....80 – 115
 - скорость сканирования, м/с.....10
 - расход инертного газа при работе Ar / N₂, л/мин.....2
 - расход защитного газа при продувке.....70 л/мин
 - сжатый воздух, требования ISO 8573-1....12,5 л/мин при 1,5 бар
 - тип лазера.....волоконный
 - мощность, Вт.....400

Выбор порошкового материала

Для работы установок методом селективного лазерного плавления используется обширный перечень металлов и их сплавов. Наиболее востребованные из них: нержавеющая сталь 316L, титановый сплав Ti-6Al-4V и др.

Сталь 316L – нержавеющая сталь, сплав которой содержит никель и молибден (таблица 1). Наличие этих элементов в нержавеющей стали значительно повышает ее антикоррозийные свойства, благодаря чему эксплуатация возможна даже в очень агрессивных средах. Также данная сталь имеет повышенную прочность, сопротивляемость к ползучести, превосходные механические свойства. Превосходные антикоррозийные свойства нержавеющей стали, а также механическая прочность делают ее очень востребованной во многих отраслях промышленности.

Таблица 1

C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Ti	Fe
0,03	<2,0	0,045	0,03	1,0	5,0– 18,0	10,0– 14,0	3,0	0,5	Остальное

Основные параметры для изготовления ступицы

Исходные параметры приведены в таблице 2.

Таблица 2

ρ , кг/м ³	$v_{\text{печ}}$, см/ч	$v_{\text{скан}}$, см/ч	N, Вт
7890	15	10	700

Алгоритм расчета основных параметров:

$$V_{\text{общ}} = a \cdot b \cdot c = 125 \cdot 125 \cdot 75 = 1\,171\,875 \text{ мм}^3 = 0,001171875 \text{ м}^3;$$

$$V_1 = pR_1^2 \cdot h = 3,14 \cdot 100^2 \cdot 10 = 78539,8 \text{ мм}^3;$$

$$V_5 = pR_5^2 \cdot h = 3,14 \cdot 102^2 \cdot 12 = 98055,39 \text{ мм}^3;$$

$$V_2 = pR_2^2 \cdot h = 3,14 \cdot 94^2 \cdot 40 = 277591,1 \text{ мм}^3;$$

$$V_6 = pR_6^2 \cdot h = 3,14 \cdot 96^2 \cdot 40 = 289529,18 \text{ мм}^3;$$

$$V_3 = pR_3^2 \cdot h = 3,14 \cdot 86^2 \cdot 10 = 58088,05 \text{ мм}^3;$$

$$V_7 = pR_7^2 \cdot h = 3,14 \cdot 88^2 \cdot 10 = 60821,234 \text{ мм}^3;$$

$$V_4 = pR_4^2 \cdot h = 3,14 \cdot 50^2 \cdot 60 = 98174,77 \text{ мм}^3;$$

$$V_8 = pR_8^2 \cdot h = 3,14 \cdot 48^2 \cdot 62 = 112192,56 \text{ мм}^3;$$

$$V_{\text{дет}} = V_1 + V_2 + V_3 - V_4 = 78539,8 + 277591,1 + 58088,05 - 98174,77 = 316044,18 \text{ мм}^3 = 0,00031604418 \text{ м}^3;$$

$$V_{\text{заг}} = V_5 + V_6 + V_7 - V_8 = 98055,39 + 289529,18 + 60821,234 - 112192,56 = 336213,244 \text{ мм}^3 = 0,000336213244 \text{ м}^3;$$

$$m_{\text{общ}} = c \cdot V_{\text{общ}} = 7890 \cdot 0,001171875 = 9,246 \text{ кг};$$

$$m_{\text{дет}} = c \cdot V_{\text{дет}} = 7890 \cdot 0,00031604418 \text{ м}^3 = 2,494 \text{ кг};$$

$$m_{\text{заг}} = c \cdot V_{\text{заг}} = 7890 \cdot 0,000336213244 \text{ м}^3 = 2,653 \text{ кг}.$$

Толщина слоя $d = 75$ мкм.

$$t_{\text{общ}} = \frac{n \cdot t_{\text{одного слоя}}}{d} = \frac{1250 \cdot 40,2}{75} = 670 \text{ мин} = 11,17 \text{ ч}.$$

Длина изделия $l = 100 \text{ мм} = 10 \text{ см}.$

$$t_{\text{одного слоя}} = \frac{l}{v_{\text{скан}}} = \frac{10}{15} = 0,67 \text{ ч} = 40,2 \text{ мин}.$$

$$A = N \cdot t = 400 \cdot 39996 = 16 \text{ МДж}.$$

Расход газа при построении: $670 \cdot 1,5 = 1005 \text{ л}.$

Расход газа при продувке: $670 \cdot 100 = 67000 \text{ л}.$

$$\text{Коэффициент использования материала: } \frac{1080,3 \cdot 100}{1171,875} = 92,2 \text{ \%}.$$

Оставшийся порошок можно использовать повторно после просеивания.

Определение припусков и допусков

Так как аддитивное производство очень точное, припуски нужны только для придания поверхности нужной шероховатости, для чего достаточно добавить к каждой стороне изделия по 1–2 мм для дальнейшего снятия механической обработкой.

Произведем расчет припуска для последующей механической обработки:

1) установим припуски:

$\varnothing 100 - 2,0 \text{ мм}$; $\varnothing 94 - 2,0 \text{ мм}$; $\varnothing 86 - 2,0 \text{ мм}$; $\varnothing 50 - 2,0 \text{ мм}$,
60 мм – 2,0 мм,
50 мм – 2,0 мм;

2) рассчитаем номинальные размеры:

$\varnothing 100 + 2,0 = 102,0 \text{ мм}$; $\varnothing 94 + 2,0 = 96,0 \text{ мм}$,
 $\varnothing 86 + 2,0 = 88,0 \text{ мм}$; $\varnothing 50 - 2,0 = 48,0 \text{ мм}$,
60 + 2,0 = 62,0 мм,
50 + 2,0 = 52,0 мм;

3) определим допуски линейных размеров:

$\varnothing 100 - 0,87 \text{ мм}$; $\varnothing 94 - 0,87 \text{ мм}$; $\varnothing 86 - 0,87 \text{ мм}$; $\varnothing 50 - 0,62 \text{ мм}$,
60 мм – 0,74 мм,
50 мм – 0,74 мм;

4) установим допуск симметричными предельными отклонениями:

$\varnothing 100 - 0,435 \text{ мм}$; $\varnothing 94 - 0,435 \text{ мм}$; $\varnothing 86 - 0,435 \text{ мм}$;
 $\varnothing 50 - 0,31 \text{ мм}$,
60 $\pm 0,37 \text{ мм}$,
50 $\pm 0,37 \text{ мм}$.

Технология изготовления ступицы методом SLM

Процесс состоит в нанесении тонкого слоя порошка на рабочий стол, передвигающийся по вертикали. Печать происходит в рабочей камере, заполняемой инертным газом. Отсутствие кислорода позволяет избегать оксидации расходного материала. Каждый слой модели сплавляется, повторяя контуры слоев цифровой модели. CAD-модель создается на компьютере и сохраняется в формате STL, который поддерживает установка SLM. Плавка производится с помощью лазерного луча, направляемого по осям X и Y двумя зеркалами с высокой скоростью отклонения. Мощность лазерного излучателя достаточно высока для плавки частиц порошка в гомогенный материал.

Выбор способа механической обработки изделия

Для поверхности ступицы наиболее эффективный способ механической обработки, обеспечивающий высокую производительность и наименьшие затраты материалов и энергии, – фрезерование, когда главным движением является вращение инструмента – фрезы, а заготовка, как правило, движется поступательно (движение подачи).

Будем использовать цилиндрическую фрезу с остроконечным сечением зубьев из быстрорежущей стали (ГОСТ 29092-91) на вертикально-фрезерном станке.

Термическая обработка

Для данного изделия выполняем термическую обработку, отпуск при температуре 700 °С в течение 2-х часов, охлаждение на воздухе для снижения внутреннего напряжения. После такой обработки имеем следующие механические свойства: предел прочности – около 320 МПа, предел текучести – 120 МПа.

Удельный расход ресурсов

Проведем расчет общей стоимости ступицы:

1) стоимость 1 кг порошка марки AISI 316L составляет 11 000 руб.;

2) стоимость порошка, необходимого для заполнения камеры:

$$11000 \times 9,246 = 101\,706 \text{ руб.};$$

3) так как после просеивания весь неиспользованный порошок пригоден для последующей печати, стоимость порошка для заполнения камеры учитываться в расходах не будет;

4) стоимость порошка, затраченного на изготовление изделия «ступица»:

$$11\,000 \times 2,653 = 29\,183 \text{ руб.};$$

5) стоимость 1 кВтч = 3,56 руб.;

6) затраты на электроэнергию:

$$(400 \times 11,17) / 1000 \times 3,56 = 15,9 \text{ руб.};$$

7) стоимость одного баллона газа Ar 40 л составляет 700 руб.;

8) стоимость газа:

$$(1005 \times 400) / 40 = 10\,050 \text{ руб.};$$

9) общая стоимость, необходимая для изготовления изделия «ступица»:

$$29\,183 + 15,9 + 10\,050 = 39\,248,9 \text{ руб.}$$

Экономическая целесообразность изготовления ступицы приведена в таблице 3.

Таблица 3

Стоимость порошка изделия, руб.	Стоимость электроэнергии, руб.	Стоимость газа, руб.	Общая стоимость изготовления изделия «ступица», руб.
29 183	15,9	10 050	39 248,9

Расчеты показывают, что большая часть затрат приходится на порошковый материал.

Рекомендации по выбору способов изготовления заготовок деталей машин и изделий методами аддитивного производства

Аддитивные технологии (АТ) основаны на принципе получения изделий методом послойного нанесения материала, традиционные – на принципе получения изделий путем удаления материала. Принципиальная схема АТ

может быть представлена в следующем виде: CAD-модель → АТ-машина → изделие.

Методом компьютерного дизайна или с применением 3D-сканеров создается модель изделия. 3D-сканирование – это автоматический сбор и анализ данных реального объекта: формы, цвета и других характеристик с последующим преобразованием в цифровую трехмерную модель.

В процессе печати изделия принтер обрабатывает файл, содержащий 3D-модель (как правило, в формате STL), и послойно наносит материал, создавая трехмерную модель. Эти слои, соответствующие виртуальным поперечным сечениям в CAD-модели, соединяются или сплавляются вместе для создания объекта заданной формы. Основным преимуществом данного метода является возможность создания геометрических форм практически неограниченной сложности.

Сегодня имеется богатый выбор методов аддитивного производства. Главные отличия заключаются в методе нанесения слоев и материалах, применяемых для печати. Некоторые методы печати базируются на расплавлении материалов: сюда входит селективное лазерное спекание (SLS), селективное лазерное плавление (SLM), прямое лазерное нанесение металлов (DMD, DLD). Другое направление это производство моделей, основанных на принципе полимеризации жидких материалов, которое носит название стереолитография (SLA).

В таблице 4 представлены основные методы аддитивного производства.

Таблица 4

Метод	Технология	Используемые материалы
Экструзионный	Моделирование методом послойного наплавления (FDM или FFF)	Термопластики (полилактид (PLA), акрилонитрилбутадиенстирол (ABS) и др.)
Порошковый	Прямое лазерное спекание металлов (DMLS)	Практически любые металлические сплавы
	Электронно-лучевая плавка (EBM)	Титановые сплавы
	Выборочная лазерная плавка (SLM)	Титановые сплавы, кобальт-хромовые сплавы, нержавеющая сталь, алюминий
	Выборочное тепловое спекание (SHS)	Порошковые термопластики
	Выборочное лазерное спекание (SLS)	Термопластики, металлические и керамические порошки
	Прямое металлическое нанесение (DMD)	Металлические порошки из инструментальной стали
Струйный	Струйная трехмерная печать (3DP)	Гипс, пластики, металлические порошки, песчаные смеси
Ламинирование	Изготовление объектов методом ламинирования (LOM)	Бумага, металлическая фольга, пластиковая пленка
Проволочный	Производство произвольных форм электронно-лучевой	Практически любые металлические сплавы

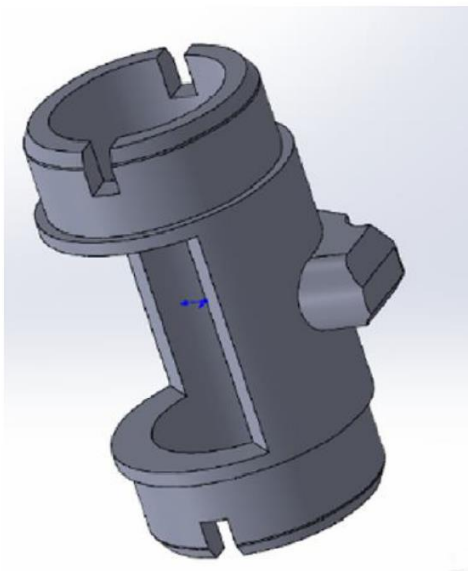
Метод	Технология	Используемые материалы
	плавкой (EBF_3)	
Полимеризация	Стереолитография (SLA)	Фотополимеры
	Цифровая светодиодная проекция (DLP)	Фотополимеры

Особенности получения изделий методом прямого лазерного нанесения

Механическая обработка, как правило, применяется для выполнения чистовых и отделочных операций при обработке фасонных заготовок, предварительно изготовленных способами литья или ОМД (обработка металлов давлением). В процессе механической обработки исходная фасонная заготовка преобразуется в готовое изделие. При этом механической обработке обычно подвергается не вся заготовка, а только те ее поверхности, которые находятся в сопряжении с поверхностями других деталей изготавливаемой продукции.

В качестве примера приведена схема механической обработки цилиндрической поверхности стального изделия на токарном станке. Наименование технологической операции – обтачивание тонкое. Тип станка – токарный или токарно-винторезный. Характеристика режущего инструмента – резец токарный, проходной, упорный, правый. Материал режущей части – металлокерамический твердый сплав Т15К6.

Для осуществления метода прямого лазерного нанесения был выбран оптимальный режим, позволяющий получать стабильное выращивание цилиндрической оболочки (образца), которая являлась основой для конечного изделия – кронштейна (рисунок 1). Процесс прямого лазерного нанесения был осуществлен с использованием алгоритма, задаваемого программой. Разработанный алгоритм позволял осуществлять манипуляции робота, удерживающего коаксиальное сопло, с одновременным включением подачи газопорошковой смеси, защитного газа и лазера.



а

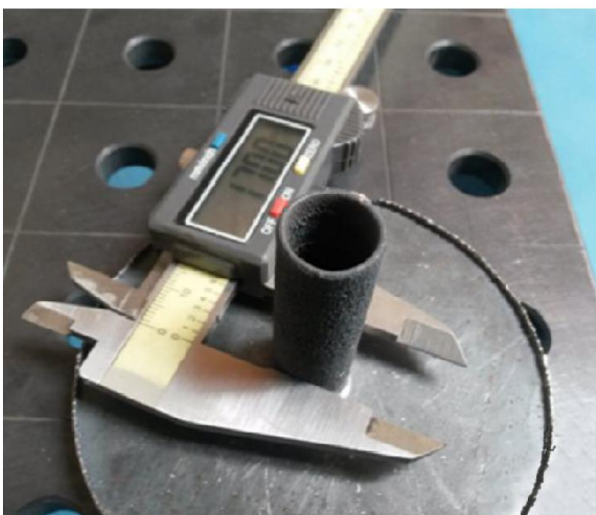


б

Рисунок 1 – Кронштейн, изготовленный методом прямого лазерного нанесения:
а – компьютерная 3D-модель кронштейна; *б* – общий вида *б*

Важной задачей являлся поиск стабильного режима выращивания образцов, который достигался тем, что наплавочное сопло поднималось при каждом последующем нанесении с шагом, соответствующим высоте одного слоя.

На рисунке 2 представлены фотографии образцов, выполненных из нержавеющей стали 316L методом прямого лазерного нанесения материала. Для получения соединительной муфты (рисунок 1, *а*, *б*) трубчатые заготовки (образцы), показанные на рисунке 2, *а*, *б*, подвергались механической обработке в соответствии с моделью (рисунок 1, *а*), а затем проводилась финишная полировка. Толщина стенки выращиваемых образцов составляла 1–1,2 мм.



а



б

Рисунок 2 – Образцы, полученные методом прямого лазерного нанесения:
а – внешний диаметр; *б* – высота

На рисунке 3 представлены профилограммы внешней и внутренней поверхностей заготовки, выращенной методом прямого лазерного нанесения.

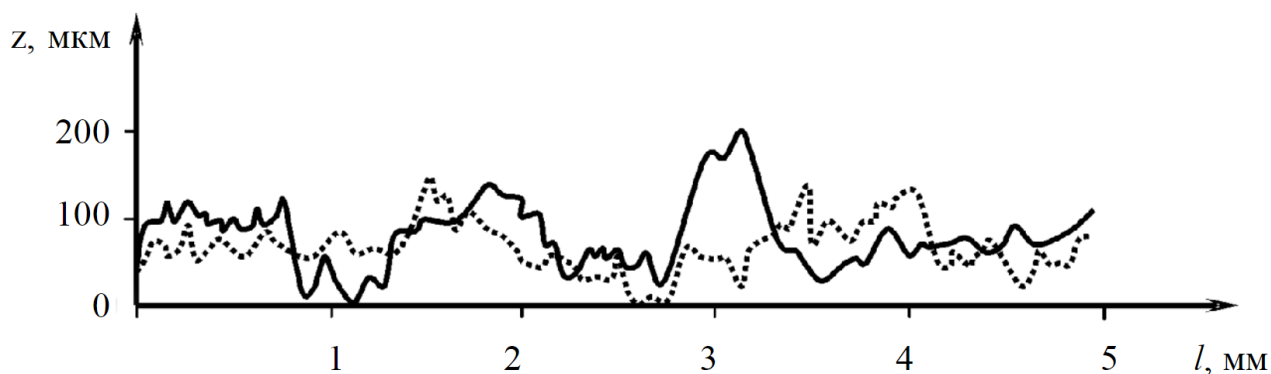


Рисунок 3 – Профилограммы поверхностей цилиндрического образца:
— — внутренняя; — наружная

Исследования поверхности показали, что шероховатость внутренних и наружных слоев образца совпадает и определяется, в основном, размером порошкового материала. Разброс между максимальным и минимальным значением не превышает 200 мкм. Класс шероховатости 16 (ГОСТ 2789)/13 (ISO1302). В соответствии с этим, избежать механической обработки или полировки невозможно в виду низкого качества получаемой поверхности цилиндрических заготовок (образцов).

На рисунке 4 представлены изображения заготовок в различных сечениях, полученные на рентгеновском томографе. Рентгеновские изображения образцов, полученных с соблюдением указанного ранее алгоритма и оптимального режима выращивания, показаны на рисунке 4, а–ж. В сечениях образцов не наблюдается образования дефектов типа пор и трещин.

Однако исследование образцов позволило выявить тот факт, что недостаточная защита в газовой среде при расплавлении порошкового материала приводит к формированию высокой пористости (рисунок 4, з, 3). В результате исследования было обнаружено, что при нахождении наплавляемого металла длительное время в состоянии перегрева, что достигалось при превышении мощности лазерного излучения выше 2 кВт, в поперечном сечении наблюдалось образование крупных пор (рисунок 4, з, 3). Также из-за нарушения стабильности газопорошкового потока, в ходе эксперимента наблюдалось «заваливание» образца вследствие растекания по поверхности подложки наплавляемого металла или его вскипания.

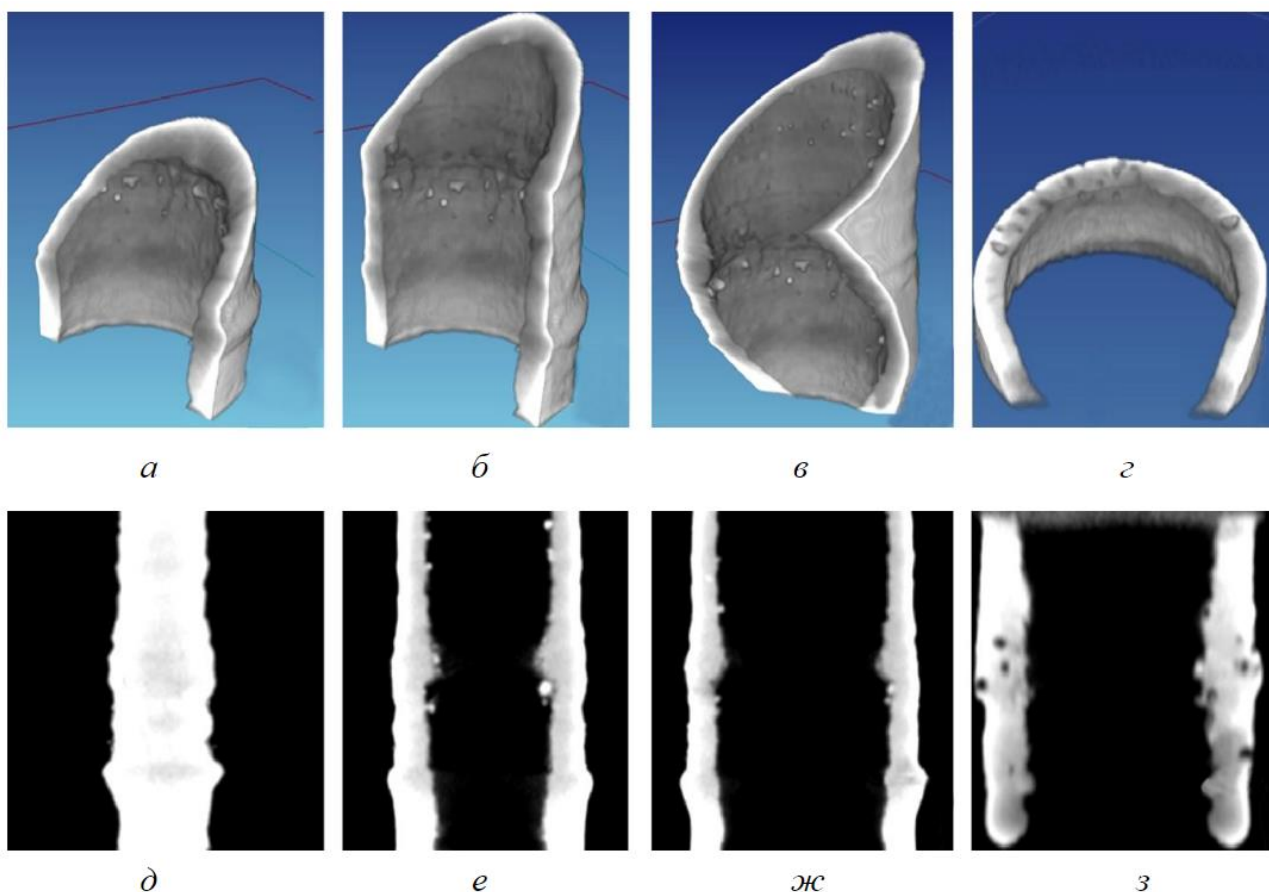
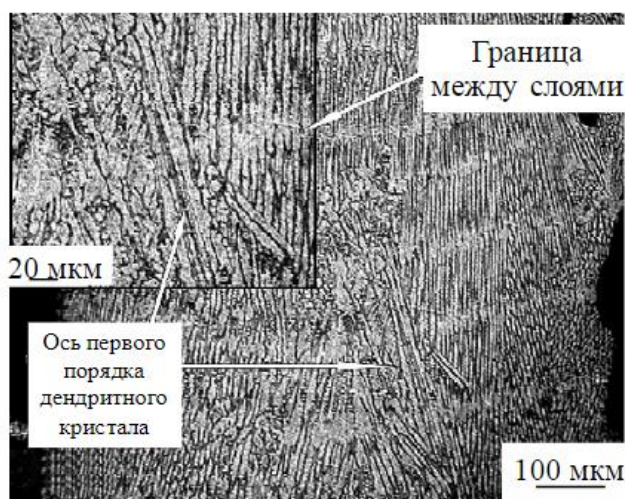


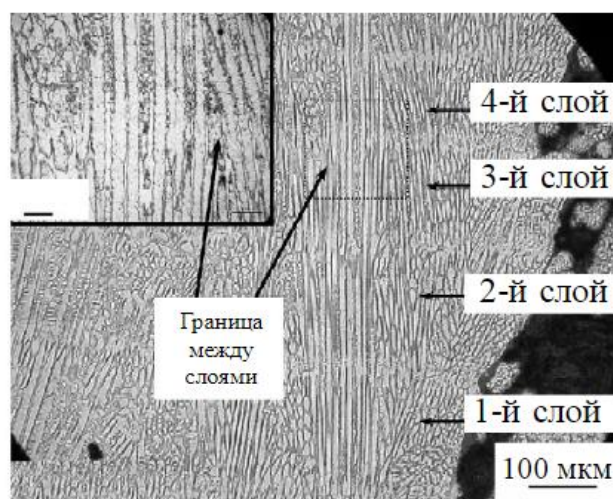
Рисунок 4 – Изображения, полученные с помощью рентгеновского томографа:
а, б, в, г – компьютерная модель цилиндрических образцов, полученная на основании множества рентгеновских снимков в различных сечениях;
д, е, ж, з – рентгеновские снимки образцов

На рисунке 5 изображена микроструктура в продольном и поперечном сечениях образца, полученного методом прямого лазерного нанесения.

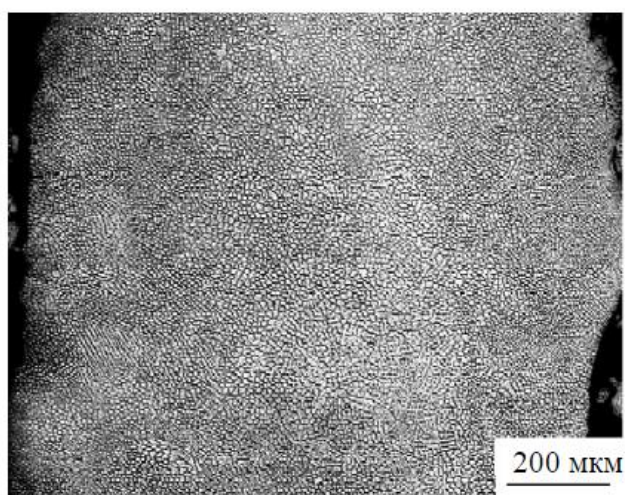
На рисунке 5 *а, б* можно видеть, что в продольном сечении образца из стали 316L произошло формирование ориентированной дендритной структуры. Однако стоит обратить внимание на тот факт, что рост дендритных кристаллов в сечениях образца (рисунок 5, *а*) не останавливается на границе слоев. При этом дендритные кристаллы имеют длину оси первого порядка ≈ 500 мкм при условии, что высота каждого нанесенного слоя в образцах составляет 100–150 мкм. На рисунке 5 *в, г* представлены микрофотографии в поперечном сечении исследуемых образцов. Оси первого порядка дендритных кристаллов, направленные перпендикулярно плоскости реза, представляют собой высокодисперсную ячеистую (сотовую) структуру, при этом границ зерен не обнаруживается. Лазерный луч локально разогревает порошковый материал до его полного расплавления, а скорость кристаллизации настолько высока, что оси второго и третьего порядков не успевают получить своего значительного развития.



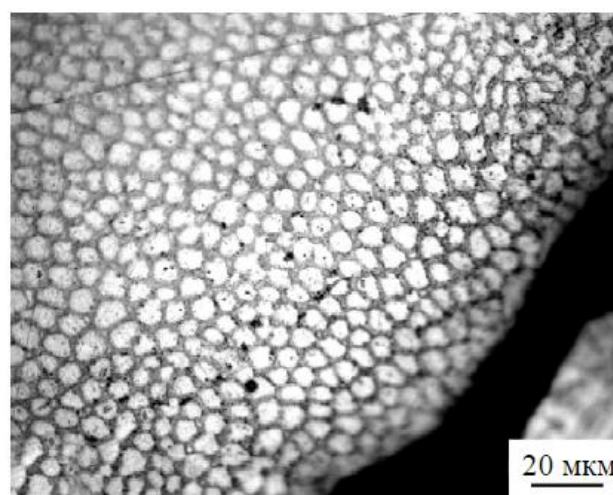
а



б



в



г

Рисунок 5 – Микроструктура в сечениях образца из стали 316L, полученного методом прямого лазерного нанесения:
а, б – продольный; *в, г* – поперечный

При спекании порошкового материала 316L методом селективного лазерного плавления в металле обнаруживается зерненная структура. Такая структура должна способствовать остановке дислокаций в процессе пластической деформации. Особенности структуры для одного и того же материала 316 L, полученного родственными методами селективного лазерного плавления и прямого лазерного нанесения, может быть объяснено различием в плотности мощности лазерного излучения, фокусируемого на обрабатываемой поверхности, степени расплавления порошкового материала, скорости кристаллизации расплава, а также степенью защиты ванны расплава в газовой среде и т. д.

Графическая часть работы

Графическая часть проекта выполняется на листах формата А4 и должна включать в себя: а) чертеж готовой детали в соответствии с выданным заданием; б) чертеж детали после 3D-печати; в) чертеж расположения детали в камере 3D-принтера.

Чертеж готовой детали должен содержать все необходимые размеры для ее изготовления и параметры шероховатости поверхностей. В соответствии с данным чертежом выбираются методы чистовой обработки заготовки, станочное оборудование и режущий инструмент по имеющимся в открытом доступе каталогам или справочникам [2, 3, 4].

Чертеж детали после 3D-печати должен содержать размеры с учетом припусков на чистовую обработку: 1–2 мм на каждую обрабатываемую поверхность. Кроме того, для каждого размера указываются предельные отклонения.

Защита работы

Оформление и переплет расчетно-пояснительной записки выполняются в соответствии с общими требованиями к оформлению курсовой работы. Все этапы проектирования, в том числе защита, должны выполняться строго по графику, который выдается вместе с заданием.

Защита работы производится устно преподавателю, выдавшему задание на курсовую работу, либо перед комиссией, назначаемой кафедрой.

Проект оценивается по пятибалльной системе с учетом: качества выполнения расчетно-пояснительной записки; качества выполнения графической части; качества доклада на защите, правильности ответов на вопросы; соблюдения графика работы над проектом.

2. КРИТЕРИИ И НОРМЫ ОЦЕНКИ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Курсовая работа предполагает комплексное использование студентом знаний по перспективным технологиям автоматизированного машиностроения. По результатам защиты курсовой работы выставляется экспертная оценка («отлично», «хорошо», «удовлетворительно» или «неудовлетворительно»), которая учитывается при аттестации по дисциплине – оценке за курсовую работу.

Преподаватель проверяет выполненные студентом пояснительную записку и чертежи и принимает защиту работы в виде устного опроса. Оценка за курсовую работу выставляется в результате оценивания преподавателем правильности выполнения работы и ответов на поставленные вопросы.

Универсальная система оценивания результатов обучения включает в себя системы оценок: 1) «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно»; 2) «зачтено», «не зачтено»; 3) 100-балльную (процентную) систему и правило перевода оценок в пятибалльную систему (таблица 5).

Таблица 5 – Система оценок и критерии выставления оценки

Система оценок Критерий	2	3	4	5
	0–40 %	41–60 %	61–80 %	81–100 %
	«неудовлетворительно»	«удовлетворительно»	«хорошо»	«отлично»
	«не зачтено»	«зачтено»		
1. Системность и полнота знаний в отношении изучаемых объектов	Обладает частичными и разрозненными знаниями, которые не может научно-корректно связывать между собой (только некоторые из которых может связывать между собой)	Обладает минимальным набором знаний, необходимым для системного взгляда на изучаемый объект	Обладает набором знаний, достаточным для системного взгляда на изучаемый объект	Обладает полнотой знаний и системным взглядом на изучаемый объект
2. Работа с информацией	Не в состоянии находить необходимую информацию, либо в состоянии находить отдельные фрагменты информации в рамках поставленной задачи	Может найти необходимую информацию в рамках поставленной задачи	Может найти, интерпретировать и систематизировать необходимую информацию в рамках поставленной задачи	Может найти, систематизировать необходимую информацию, а также выявить новые, дополнительные источники информации в рамках поставленной задачи
3. Научное осмысление изучаемого явления, процесса,	Не может делать научно-корректных выводов из	В состоянии осуществлять научно-корректный	В состоянии осуществлять систематический и научно-	В состоянии осуществлять систематический и научно-корректный

Система оценок Критерий	2	3	4	5
	0–40 %	41–60 %	61–80 %	81–100 %
	«неудовлетворительно»	«удовлетворительно»	«хорошо»	«отлично»
	«не зачтено»	«зачтено»		
объекта	имеющихся у него сведений, в состоянии проанализировать только некоторые из имеющихся у него сведений	анализ предоставленной информации	корректный анализ предоставленной информации, вовлекает в исследование новые релевантные задаче данные	анализ предоставленной информации, вовлекает в исследование новые релевантные поставленной задаче данные, предлагает новые ракурсы поставленной задачи
4. Освоение стандартных алгоритмов решения профессиональных задач	В состоянии решать только фрагменты поставленной задачи в соответствии с заданным алгоритмом, не освоил предложенный алгоритм, допускает ошибки	В состоянии решать поставленные задачи в соответствии с заданным алгоритмом	В состоянии решать поставленные задачи в соответствии с заданным алгоритмом, понимает основы предложенного алгоритма	Не только владеет алгоритмом и понимает его основы, но и предлагает новые решения в рамках поставленной задачи

При необходимости для обучающихся-инвалидов или обучающихся с ОВЗ предоставляется дополнительное время для подготовки ответа с учетом их индивидуальных психофизических особенностей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горунов, А. И. Аддитивные технологии и материалы: учеб. пособие / А. И. Горунов. – Казань: КНИТУ-КАИ, 2019. – 56 с. – ISBN 978-5-7579-2360-4. – Текст: электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/144008>.
2. Лазерные аддитивные технологии в машиностроении : учебное пособие / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюров, Р. С. Третьяков ; под ред. А. Г. Григорьянца. - Москва : МГТУ им. Баумана, 2018. - 280 с.
3. НПП ИНТЕХРУС | Российский твердосплавный инструмент / [Электронный ресурс] // Интехрус: [сайт]. – URL: <https://intehrus.ru/>.
4. ARCONIT – Режущий инструмент / [Электронный ресурс] // Arconit: [сайт]. – URL: <https://arconit.ru/>.