

Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна
Должность: проректор по учебной работе
Дата подписания: 30.09.2023 16:59:39
Уникальный программный ключ:
0b817ca911e6668abb13a50426659eb1c11eabb75e943df2448511da56d089

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)

Кафедра машиностроительных технологий и оборудования

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

О.Г. Локтионова

« 30 » 09



АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Методические указания по выполнению практических работ
для студентов направления подготовки 15.04.01
«Машиностроение»

Курск 2023

УДК 621.791

Составители: А.В. Олещицкий, А.Н. Гречухин

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент *С.А. Чевычелов*

Аддитивные технологии: методические указания по выполнению практических работ для студентов направления подготовки 15.04.01 «Машиностроение» / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: А.В. Олещицкий, А.Н. Гречухин. – Курск, 2023. – 50 с.: ил. 26., табл. 14. – Библиогр.: с. 50.

Изложены методические рекомендации по выполнению практических работ по дисциплине «Аддитивные технологии». Указывается содержание теоретической части, порядок выполнения работы, методика обработки результатов и оформления практических работ.

Методические указания соответствуют требованиям ФГОС ВО направления подготовки 15.04.01 «Машиностроение».

Предназначены для студентов очной и заочной формы обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 04.09.2023 г. Формат 60x84 1/16
Усл. печ. л. 1,4. Уч.-изд. л. 1,2 Тираж 100 экз. Заказ 300.
Бесплатно.

Юго-Западный государственный университет.
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94

Оглавление

Общие методические рекомендации	4
Содержание отчета	4
Практическая работа №1 «Изучение функциональных блоков оборудования для аддитивного производства»	5
Практическая работа №2 «Написание управляющих программ оборудования для аддитивного производства»	10
Практическая работа №3 «Изучение технологии FDM/FFF» ...	18
Практическая работа №4 «Изучение технологии DLP/LCD» ...	30
Практическая работа №5 «Изучение технологии DED/WAAM»	40
Библиографический список	50

Общие методические рекомендации

Перед выполнением практических работ студенты должны пройти инструктаж по технике безопасности, получить у лаборанта техническую документацию материалы и инструмент. Перед началом опытов каждый студент должен ознакомиться со схемой и устройством опытной установки и характеристиками приборов. До начала эксперимента необходимо подготовить таблицы для записи показаний приборов, изменений и результатов расчетов. После окончания работы рабочее место, оборудование и аппаратура приводятся в порядок и сдаются лаборанту

Для более полного ответа на контрольные вопросы во время практических работ необходимо пользоваться учебной литературой и конспектом лекций.

Содержание отчета

Отчёт составляется после выполнения студентом практической работы и должен включать:

1. Титульный лист с названием работы;
2. Цель практической работы;
3. Оборудование, ПО, использовавшиеся при выполнении практической работы;
4. Пошаговое выполнение (включая эскизы и схемы, необходимые расчетные формулы и расчеты, экспериментальные данные в виде таблиц, обработку результатов опытов);
5. Заключение;
6. Ответы на контрольные вопросы.

После подготовки отчёта и проверки его преподавателем, студент может быть допущен к его защите. Студенты, не предоставившие отчёт или выполнившие его неверно, не могут быть допущены к защите.

Практическая работа №1

«Изучение функциональных блоков оборудования для аддитивного производства»

1. Цель работы

Изучение функциональных блоков оборудования для аддитивного производства.

2. Общие положения

2.1 Краткие теоретические сведения

Аддитивное производство (АП) (аддитивный технологический процесс) (additive manufacturing) – процесс изготовления деталей, который основан на создании физического объекта по электронной геометрической модели путем добавления материала, как правило, слой за слоем, в отличие от вычитающего (субтрактивного) производства (механической обработки) и традиционного формообразующего производства (литья, штамповки) [1].

Оборудование для аддитивного производства – станок с числовым программным управлением, реализующий только аддитивные операции, то есть добавляющий порции материала к заготовке.

Таблица 1 – Классификация функциональных блоков оборудования для аддитивного производства

Блок /параметр	Тип / значение
Аппаратная часть	
Рама	Цельная
	Сборная
Корпус	Открытый
	Закрытый
Компоновка	Горизонтальная
	Вертикальная
	Наклонная
Кинематика	Картезианская – основаны на декартовой системе координат, оси X, Y и Z («Prusa», консольный принтер, H-bot, Core-XY, «Makerbot», «Ultimaker», Core-XYZ, IDEX, конвейерный тип)
	Параллельная – все оси одновременно отвечают за положение печатающей рабочего инструмента в пространстве (дельта роботы, гексаподы)
	Полярная – отличие в замене декартовых координат на полярные в горизонтальной плоскости

	<p>Роботизированные манипуляторы</p> <p>SCARA – основана на перемещение рабочего инструмента в горизонтальной плоскости (X и Y) за счет сочленения рычажного механизма. Перемещение рабочего инструмента вдоль оси Z вместе с этим механизмом происходит по вертикальной направляющей</p> <p>Гибридная – сочетает два и более вида кинематики</p>
Количество осей	3 оси
	4 оси
	5 осей
	6 и более осей
Направляющие	Качения (роликовые, шариковые)
	Скольжения (гидростатические, гидродинамические, аэростатические, аэродинамические)
	Комбинированные
Механическая передача	Вращательная (зубчатая, планетарная, волновая, цепная, ременная, фрикционная, циклоидальная, карданная, муфты)
	Прямолинейная (реечная, передача винт-гайка)
	Гальванометрические сканаторы (для лазеров)
Двигатели	Шаговые двигатели (ШД)
	Серводвигатели
Рабочий стол	Неподвижный
	Подвижный
Рабочий инструмент	Устройство подачи материала (экструдер, форсунки, устройство подачи проволоки, порошка)
	Устройство передачи энергии материалу (нагреватель, электрод, лазер, электронно-лучевая пушка, УФ-излучатель)
Устройства обратной связи	Концевые выключатели (оптические, индуктивные, механические)
	Энкодеры вращательные и линейные, накапливающие (инкрементные) и абсолютные (позиционные) (оптические, резистивные, магнитные, индуктивные, механические)
	Терморезисторы, термопары
	Видеокамеры, лидары
Устройства управления	Контроллер
	Устройство ручного ввода информации
	Реле
	Драйверы двигателей
Устройства питания	Постоянного тока
	Переменного тока
	Комбинированное питание
	Цельное
	Раздельное
Вспомогательные системы	Системы нагрева (электронагреватели, термокамера)
	Системы охлаждения (вентиляторы, водяное охлаждение, элементы Пельтье)
	Системы коммуникации (провода, подача газов, жидкостей)
Программная часть	
Программное обеспечение (ПО)	Для формирования и реализации управляющей программы
Технические характеристики	
Производитель	Наименование
Модель	Наименование

Страна	Наименование
Материал печати	Тип
Технология печати	Тип
Область построения	XxYxZ мм
Скорость построения	мм/с; мм/мин; мм/ч
Электропитание	V, Hz
Габариты товара	XxYxZ мм
Вес нетто	кг

Расчет перемещений для наиболее часто используемых механических передач в оборудовании для аддитивного производства:

- расчет количества шагов на 1 оборот ШД

$$x = \frac{360}{\alpha \cdot y} \text{ [шаг./об.]},$$

где α – величина шага ШД;

y – разрешение микрошага;

- расчет количества шагов зубчатой передачи

$$s = \frac{x}{m \cdot z} \text{ [шаг./мм.]},$$

где m – модуль зубчатого колеса, мм;

z – количество зубьев зубчатого колеса;

- расчет количества шагов реечной передачи

$$s = \frac{x}{m \cdot z} \text{ [шаг./мм.]},$$

где m – модуль зубчатого колеса, мм;

z – количество зубьев зубчатого колеса;

- расчет количества шагов ременной передачи

$$s = \frac{x}{t \cdot z} \text{ [шаг./мм.]},$$

где t – шаг ремня, мм;

z – количество зубьев шкива;

- расчет количества шагов передачи винт-гайка

$$s = \frac{x}{t \cdot z} \text{ [шаг./мм.]},$$

где t – шаг резьбы, мм;

z – количество заходов резьбы.

2.2 Описание лабораторного стенда



Рисунок 1 – 3D принтер ЛенГрупп NEO



Рисунок 2 – 3D принтер Anycubic Photon M3

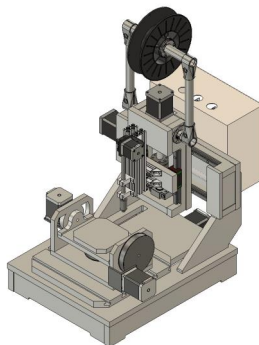


Рисунок 3 – 3D принтер ЮЗГУ WAAM

3. Порядок выполнения работы

3.1 Ознакомиться с техникой безопасности и правилами поведения в лаборатории;

3.2 Выполнить расчеты в соответствии с заданием преподавателя;

3.3 Внимательно изучить устройство и правила эксплуатации 3D принтера;

3.4 Внимательно изучить ПО;

3.5 Выполнить классификацию функциональных блоков оборудования для аддитивного производства (Таблица 2);

Таблица 2 – Форма таблицы классификации

Блок / параметр	Тип / значение
Аппаратная часть	
Программная часть	
Технические характеристики	

3.6 Оформить отчёт о выполнении практической работы.

4. Контрольные вопросы

4.1 Дайте определение аддитивному производству (АП) (аддитивный технологический процесс) (additive manufacturing);

4.2 Дайте определение оборудованию для аддитивного производства;

4.3 Какие существуют функциональные блоки оборудования для аддитивного производства?

Практическая работа №2

«Изучение языка программирования G-code оборудования для аддитивного производства»

1. Цель работы

Изучение языка программирования G-code оборудования для аддитивного производства.

2. Общие положения

2.1 Краткие теоретические сведения

G-код (G-code) – условное именование языка программирования устройств с числовым программным управлением (ЧПУ). Был создан компанией Electronic Industries Alliance в начале 1960-х. Окончательная доработка была одобрена в феврале 1980 года как стандарт RS274D. Комитет ISO утвердил G-код как стандарт ISO 6983-1:2009, Госкомитет по стандартам СССР – как ГОСТ 20999-83. В советской технической литературе G-код обозначается как код ИСО 7-бит (ISO 7-bit), это вызвано тем, что G-код кодировали на 8-дорожечную перфоленту в коде ISO 7-bit (разработан для представления информации УЧПУ в виде машинного кода так же, как и коды AEG и PC8C), восьмая дорожка использовалась для контроля чётности.

Производители систем УЧПУ (CNC), как правило, используют ПО управления станком, для которого написана (оператором) программа обработки в качестве осмысленных команд управления, используется G-код в качестве базового подмножества языка программирования, расширяя его по своему усмотрению.

G-code – это также стандартный язык, используемый многими моделями 3D-принтеров для управления процессом печати. Файлы GCODE могут быть открыты с помощью различных программ 3D-печати, например, Simplify3D, GCode Viewer, а также с помощью текстового редактора, поскольку их содержимое представляет собой обычный текст.

Отличие G-code оборудования для аддитивного производства от классического G-code часто состоит лишь в наличии уникальных команд для того или иного типа устройств.

Таблица 3 – Основные команды G-code

Команда	Описание	Применение			
		G-code	Mach3	grbl	Marlin
Основные команды					
G00	Ускоренное перемещение инструмента (холостой ход)	Да	Да	Да	Да
G01	Линейная интерполяция	Да	Да	Да	Да
G02	Круговая интерполяция по часовой стрелке	Да	Да	Да	Да
G03	Круговая интерполяция против часовой стрелки	Да	Да	Да	Да
G04	Задержка выполнения программы	Да	Да	Да	Да
G10	Переключение абсолютной системы координат	Да	Да	Да	Да (Откат пластика)
G11	Подача пластика	Нет	Нет	Нет	Да
G12	Круглый карман по часовой стрелке	Нет	Да	Нет	Да (Очистка сопла)
G13	Круглый карман против часовой стрелки	Нет	Да	Нет	Нет
G15	Переход в полярную (цилиндрическую) систему координат	Да	Да	Нет	Нет
G16	Отмена полярной системы координат	Да	Да	Нет	Нет
G17	Выбор рабочей плоскости X-Y	Да	Да	Да	Да
G18	Выбор рабочей плоскости Z-X	Да	Да	Да	Да
G19	Выбор рабочей плоскости Y-Z	Да	Да	Да	Да
G20	Режим работы в дюймовой системе	Да	Да	Да	Да
G21	Режим работы в метрической системе	Да	Да	Да	Да
G22	Активировать установленный предел перемещений	Да	Нет	Нет	Нет
G28	Вернуться на референтную точку	Да	Да	Да	Да
G28.1	Базовые оси	Нет	Да	Да	Нет
G29	Создание сетки кривизны стола	Нет	Нет	Нет	Да
G30	Поднятие по оси Z на точку смены инструмента	Да	Да	Да	Да (одиночный Z-щуп)
G30.1	Установка заранее определенной позиции	Нет	Нет	Да	Нет
G31	Перемещение осей в заданную позицию	Нет	Да	Нет	Да (док-сани)
G38.2	Проба в направлении рабочего стола, остановка при контакте, ошибка в случае неудачи	Нет	Нет	Да	Да
G38.3	Проба в направлении рабочего стола, остановка при контакте	Нет	Нет	Да	Да

G38.4	Проба в направлении от рабочего стола, остановка при разрыве контакта, ошибка в случае неудачи	Нет	Нет	Да	Да
G38.5	Проба в направлении от рабочего стола, остановка при разрыве контакта	Нет	Нет	Да	Да
G40	Отмена компенсации радиуса инструмента	Да	Да	Да	Нет
G41	Компенсировать радиус инструмента слева от траектории	Да	Да	Нет	Нет
G42	Компенсировать радиус инструмента справа от траектории	Да	Да	Нет	Да (Переход к координатам сетки)
G43	Компенсировать длину инструмента в положительную сторону	Да	Нет	Нет	Нет
G43.1	Смещение длины инструмента	Нет	Нет	Да	Нет
G44	Компенсировать длину инструмента в отрицательную сторону	Да	Нет	Нет	Нет
G49	Отмена компенсации длины инструмента	Да	Да	Да	Нет
G50	Сброс всех масштабирующих коэффициентов в 1,0	Да	Да	Нет	Нет
G51	Назначение масштабов	Да	Да	Нет	Нет
G53	Переход в систему координат станка	Да	Да	Да	Да
G54- G59	Переключиться на заданную оператором систему координат	Да	Да	Да	Да
G61- G64	Переключение режимов Точный Стоп/Постоянная скорость	Да	Да	Нет	Да (Сохранить текущую позицию / Возврат в сохраненную позицию)
G68	Поворот координат на нужный угол	Да	Нет	Нет	Нет
G70	Цикл продольного чистового точения	Да	Нет	Нет	Нет
G71	Цикл многопроходного продольного чернового точения	Да	Нет	Нет	Нет
G80	Отмена циклов сверления, растачивания, нарезания резьбы метчиком и т. д.	Да	Да	Да	Да (Отмена текущего режима движения)
G81	Цикл сверления	Да	Да	Нет	Нет
G82	Цикл сверления с задержкой	Да	Да	Нет	Нет
G83	Цикл прерывистого сверления	Да	Да	Нет	Нет

G84	Цикл нарезания резьбы	Да	Да	Нет	Нет
G85	Стандартный цикл развёртывания	Нет	Да	Нет	Нет
G86	Предполагаемый постоянный цикл растачивания	Нет	Да	Нет	Нет
G87	Предполагаемый постоянный цикл обратного растачивания	Нет	Да	Нет	Нет
G88	Предполагаемый постоянный цикл растачивания	Нет	Да	Нет	Нет
G89	Постоянный цикл растачивания	Нет	Да	Нет	Нет
G90	Задание абсолютных координат опорных точек траектории	Да	Да	Да	Да
G91	Задание координат инкрементально относительно координат последней введённой опорной точки	Да	Да	Да	Да
G91.1	Режимы расстояния Arc IJK	Нет	Нет	Да	Нет
G92	Координаты смещения и заданные параметры	Да	Да	Да	Да
G92.1	Отмена G92 и параметров	Нет	Да	Да	Нет
G92.2	Отмена G92 с сохранением параметров	Нет	Да	Нет	Нет
G92.3	Отмена параметров	Нет	Да	Нет	Нет
G93	Обратный режим подачи времени	Нет	Да	Да	Нет
G94	F (подача) – в формате мм/мин	Да	Да	Да	Нет
G95	F (подача) – в формате мм/об	Да	Да	Нет	Нет
G98	Возврат к исходному уровню после постоянных циклов	Нет	Да	Нет	Нет
G99	После каждого цикла не отходить на <проходную точку>	Да	Да	Нет	Нет
Технологические команды					
M00	Приостановить работу станка до нажатия кнопки <старт> на пульте управления, так называемая <безусловная технологическая остановка>	Да	Да	Да	Да
M01	Приостановить работу станка до нажатия кнопки <старт>, если включён режим подтверждения остановки	Да	Да	Да	Да
M02	Конец программы, без сброса модальных функций	Да	Да	Да	Да
M03	Начать вращение шпинделя по часовой стрелке	Да	Да	Да	Да
M04	Начать вращение шпинделя против часовой стрелки	Да	Да	Да	Да
M05	Остановить вращение шпинделя	Да	Да	Да	Да
M06	Сменить инструмент	Да	Да	Нет	Нет
M07	Включить дополнительное охлаждение	Да	Да	Да	Да
M08	Включить основное охлаждение	Да	Да	Да	Да
M09	Выключить охлаждение	Да	Да	Да	Да

M13	Включить одновременно охлаждение и вращение шпинделя по часовой стрелке	Да	Нет	Нет	Нет
M14	Включить одновременно охлаждение и вращение шпинделя против часовой стрелки	Да	Нет	Нет	Нет
M17	Возврат из подпрограммы или из макроса (действие аналогично M99)	Да	Нет	Нет	Да (Включить/Подать питание на все шаговые двигатели)
M18	Убрать ток с двигателей (действие аналогично M84)	Нет	Нет	Нет	Да
M20	Список файлов на SD карте	Нет	Нет	Нет	Да
M21	Инициализация SD карты	Нет	Нет	Нет	Да
M22	Освобождение SD карты	Нет	Нет	Нет	Да
M23	Выбор файла на SD карте	Нет	Нет	Нет	Да
M24	Начало/продолжение печати с SD карты	Нет	Нет	Нет	Да
M25	Замена инструмента вручную	Да	Нет	Нет	Да (Пауза печати с SD карты)
M28	Начать запись на SD карту	Нет	Нет	Нет	Да
M29	Остановить запись на SD карту	Нет	Нет	Нет	Да
M30	Конец программы, со сбросом модальных функций и изменением указателя номера кадра на начало программы	Да	Да	Да	Да (Удалить файл с SD карты)
M32	Выбрать файл и начать печать с SD карты	Нет	Нет	Нет	Да
M47	Повторить программу с первой строки	Нет	Да	Нет	Нет
M48	Разрешить переопределять скорость подачи	Да	Да	Нет	Да (Проверка повторяемости и зонда)
M49	Запретить переопределение скорости подачи	Да	Да	Нет	Нет
M80	Включить блок питания ATX	Нет	Нет	Нет	Да
M81	Выключить блок питания ATX	Нет	Нет	Нет	Да
M82	Установить экструдер в абсолютный режим	Нет	Нет	Нет	Да
M83	Установить экструдер в относительный режим	Нет	Нет	Нет	Да
M84	Перевести моторы в режим ожидания	Нет	Нет	Нет	Да
M92	Установить количество шагов по осям на единицу	Нет	Нет	Нет	Да
M97	Запуск подпрограммы, находящейся в той же программе	Да	Нет	Нет	Нет

M98	Запуск подпрограммы, находящейся отдельно от основной программы	Да	Да	Нет	Нет
M99	Конец подпрограммы и переход в вызвавшую программу	Да	Да	Нет	Нет
M104	Установить температуру экструдера и НЕ ждать	Нет	Нет	Нет	Да
M105	Получить температуру экструдера	Нет	Нет	Нет	Да
M106	Включить вентилятор обдува детали	Нет	Нет	Нет	Да
M107	Выключить вентилятор	Нет	Нет	Нет	Да
M108	Отменить нагрев	Нет	Нет	Нет	Да
M109	Установить температуру экструдера и ждать	Нет	Нет	Нет	Да
M110	Установить номер текущей строки	Нет	Нет	Нет	Да
M112	Экстренная остановка	Нет	Нет	Нет	Да
M114	Получение текущих позиций	Нет	Нет	Нет	Да
M115	Получить версию прошивки	Нет	Нет	Нет	Да
M119	Получить статус концевиков	Нет	Нет	Нет	Да
M140	Установить температуру стола и НЕ ждать	Нет	Нет	Нет	Да
M190	Установить температуру стола и ждать	Нет	Нет	Нет	Да
M200	Установить РЕАЛЬНЫЙ диаметр прутка филамента.	Нет	Нет	Нет	Да
M201	Установка максимальных ускорений (в мм/с ²)	Нет	Нет	Нет	Да
M202	Установка максимального ускорения для простого(холостого) перемещения	Нет	Нет	Нет	Да
M203	Установка максимальной скорости (в мм/с)	Нет	Нет	Нет	Да
M204	Установка ускорений (в мм/с ²)	Нет	Нет	Нет	Да
M205	Установка максимальных рывков (jerk) (мм/сек)	Нет	Нет	Нет	Да
M206	Установка смещений относительно концевиков (ноля)	Нет	Нет	Нет	Да
M207	Установка параметров ретракта (втягивание прутка)	Нет	Нет	Нет	Да
M208	Параметры восстановления подачи прутка после ретракта	Нет	Нет	Нет	Да
M209	Вкл/выкл автоматического ретракта	Нет	Нет	Нет	Да
M218	Установка смещения головы	Нет	Нет	Нет	Да
M301	Записать PID параметры хотэнда	Нет	Нет	Нет	Да
M302	Разрешить выдавливание при температуре Snnn и выше	Нет	Нет	Нет	Да
M303	Запустить процесс PID калибровки для стола/хотэнда	Нет	Нет	Нет	Да
M304	Записать PID параметры стола	Нет	Нет	Нет	Да

M404	Установка номинальной толщины филамента 1,75 или 3	Нет	Нет	Нет	Да
M420	Вкл/выкл использования сетки компенсации кривизны стола (MESH_BED_LEVELING)	Нет	Нет	Нет	Да
M500	Сохранение данных в EEPROM	Нет	Нет	Нет	Да
M504	Чтение данных из EEPROM	Нет	Нет	Нет	Да
M600	Команда для автоматической смены филамента	Нет	Нет	Нет	Да
Параметры команд					
X	Перемещение инструмента в заданную точку с заданной координатой по оси X	Да	Да	Да	Да
Y	Аналогично X по оси Y	Да	Да	Да	Да
Z	Аналогично X по оси Z	Да	Да	Да	Да
A	Аналогично X по оси A	Да	Да	Да	Да
B	Аналогично X по оси B	Да	Да	Да	Да
C	Аналогично X по оси C	Да	Да	Да	Да
E	Аналогично X по оси E	Нет	Нет	Нет	Да
P	Время задержки в миллисекундах	Да	Да	Да	Да
O	Метка подпрограммы с указанным номером	Да	Да	Нет	Да
F	Линейная скорость перемещения инструмента	Да	Да	Да	Да
S	Частота вращения шпинделя в оборотах в минуту	Да	Да	Да	Да
T	Указание номера инструмента в команде смены инструмента	Да	Да	Да	Да
R	Расстояние отвода инструмента в повторяющихся циклах обработки	Да	Да	Да	Да
D	Параметр коррекции радиуса выбранного инструмента	Да	Да	Нет	Да
L	Число вызовов подпрограммы, число вызовов макроса, или количество циклов в повторяющихся операциях	Да	Да	Да	Да
I	Указание смещения по оси X координаты центра дуги при круговой интерполяции перемещения инструмента (см G02, G03)	Да	Да	Да	Да
J	Аналогично параметру I для оси Y	Да	Да	Да	Да
K	Аналогично параметру I для оси Z	Да	Да	Да	Да
N	Номер кадра	Да	Да	Да	Да

2.2 Описание лабораторного стенда

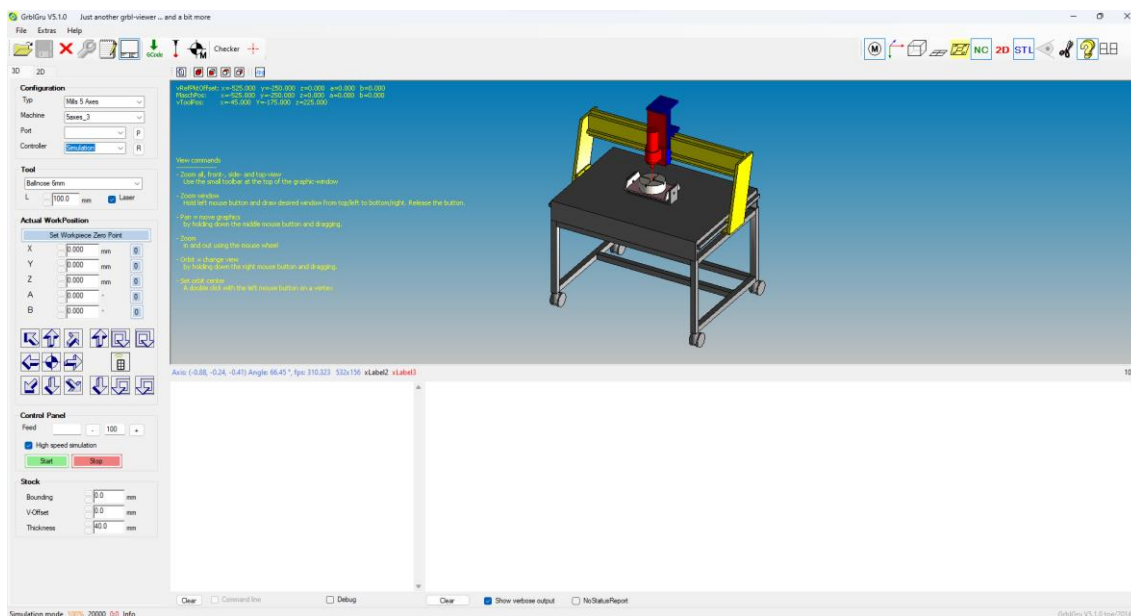


Рисунок 4 – ПО GrblGru v5.1.0

3. Порядок выполнения работы

3.1 Ознакомиться с техникой безопасности и правилами поведения в лаборатории;

3.2 Составить управляющую программу в соответствии с заданием преподавателя;

3.3 Внимательно изучить устройство и правила эксплуатации 3D принтера;

3.4 Внимательно изучить ПО;

3.5 Выполнить симуляцию составленной управляющей программы, при необходимости внести коррективы (Таблица 2);

Таблица 3 – Форма отчетной таблицы

Задание	G-code

3.6 Оформить отчёт о выполнении практической работы.

4. Контрольные вопросы

4.1 Дайте определение G-code;

4.2 Какие существуют виды команд в G-code?

4.3 Какие существуют параметры команд в G-code?

Практическая работа №3 «Изучение технологии FDM/FFF»

1. Цель работы

Изучение технологии FDM/FFF.

2. Общие положения

2.1 Краткие теоретические сведения

Экструзия материала (material extrusion) – процесс АП, в котором материал выборочно подается через сопло или жиклер [1].
Процесс экструзии материала приведен на рисунке 5.

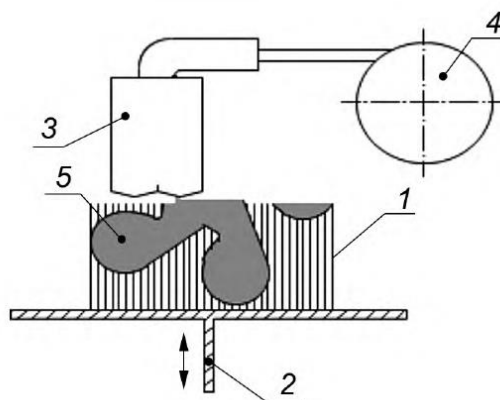


Рисунок 5 – Схема процесса экструзии материала: 1 – поддерживающая структура; 2 – строительная платформа и подъемник; 3 – подогреваемое сопло; 4 – поставка сырья; 5 – получаемый продукт

Для данного процесса необходимо следующее оборудование: строительная платформа и подъемник, подогреваемое сопло [2].

Сырье: волокно или пасты, как правило, термопласты и структурная керамика.

Механизм связи: химическая и/или термическая реакция связывания.

Источник активации: тепло, ультразвук или химическая реакция между компонентами.

Вторичная обработка: удаление поддерживающей структуры [3].

FDM (Fused Deposition Modeling) – метод послойного наплавления с использованием пластиковой нити или гранул. Принцип работы основан на изготовлении объекта путем послойного нанесения предварительно расплавленного гранулированного пластика или расплавленной пластиковой нити. Другое название этой технологии – FFF (Fused Filament Fabrication) [4].

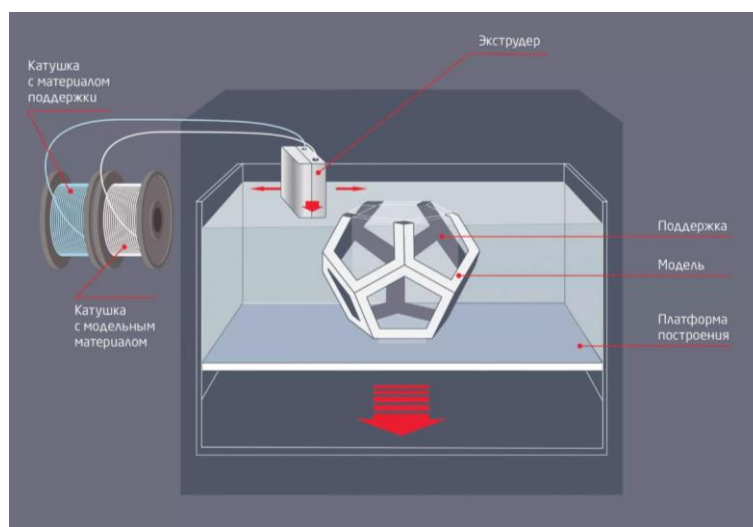


Рисунок 6 – Схема процесса FDM/FFF

Технология FDM/FFF – наиболее распространенная форма 3D-печати потребительского уровня, чему способствовало распространение любительских 3D-принтеров.

Технология FDM/FFF хорошо подходит для изготовления базовых экспериментальных моделей, а также для быстрого и недорогого создания прототипов простых изделий, например, деталей, которые обычно подвергаются механической обработке.

Технология FDM/FFF потребительского класса имеет самое низкое разрешение и точность по сравнению другими процессами 3D-печати из пластмасс, из-за чего она не подходит для печати сложных конструкций или моделей с замысловатыми элементами. Повысить качество поверхности моделей, напечатанных по этой технологии, можно с помощью химических и механических процессов полировки. Решить эти проблемы могут промышленные 3D-принтеры на базе технологии FDM/FFF, которые предлагают более широкий ассортимент инженерных термопластов, но и стоят значительно дороже.

Каждый слой формируется термопластичной нитью. Иногда, если слои не полностью прилегают друг к другу, между ними могут остаться пустоты. В результате получаются **анизотропные** модели, что важно учитывать при проектировании изделий, которые должны выдерживать нагрузку и быть устойчивыми к натяжению [5].

Таблица 4 – Материалы технологии FDM/FFF

Материалы	Характеристики	Применение
ABS (акрилонитрил-бутадиен-стирол)	Прочный и долговечный Термостойкий и ударопрочный Потребность в подогреваемой платформе для печати Потребность в вентиляции	Функциональные прототипы
PLA (полимолочная кислота)	Самый простой материал для печати по технологии FDM Прочный, жесткий, но хрупкий Менее устойчивый к воздействию температуры и химических веществ Биоразлагаемый Не имеет запаха	Концептуальные модели Реалистичные прототипы
PETG (полиэтилентерефталатгликоль)	Совместим с низкими температурами печати для ускоренного производства Устойчивый к воздействию влаги и химических веществ Высокая прозрачность Может быть совместим с пищевыми продуктами	Применение для обеспечения водонепроницаемости Компоненты с соединениями на защелках
Nylon (нейлон)	Жесткий, долговечный и легкий Прочный и частично гибкий Термостойкий и ударопрочный Сложный для печати по технологии FDM	Функциональные прототипы Износостойкие модели
TPU (термополиуретан)	Гибкий и поддающийся растяжению Ударопрочный Превосходно гасит вибрации	Гибкие прототипы
PVA (поливиниловый спирт)	Материал для создания растворимых поддерживающих структур Растворяется в воде	Материал для поддерживающих структур

HIPS (Ударопрочный полистирол)	Материал для создания растворимых поддерживающих структур, наиболее часто используемый с АБС Растворяется в D-лимонене	Материал для поддерживающих структур
Композитные материалы (углеродное волокно, кевлар, оптоволокно)	Прочный, жесткий и невероятно твердый Совместим только с некоторыми дорогими промышленными 3D-принтерами на базе технологии FDM	Функциональные прототипы Зажимные и крепежные приспособления, инструментальная оснастка

Филамент — это необходимое сырье для FDM/FFF 3D принтеров и на сегодняшний день существуют тысячи различных филаментов, каждый из которых изготавливается с использованием различных материалов и добавок. Но всех их объединяет один способ изготовления: с помощью экструдера.

В данном случае экструдеры для производства филаментов — это не то же самое, что экструдер в FDM/FFF 3D принтерах. Это устройства, которые расплавляют гранулы пластика и проталкивают расплавленный пластик через сопло, создавая нитевидную форму филамента для 3D-печати.

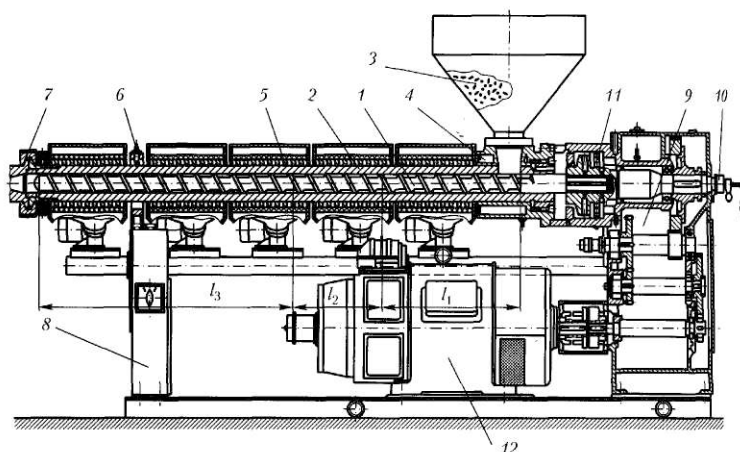


Рисунок 7 – Принципиальное устройство одношнекового экструдера: 1 – шнек, 2 – материальный цилиндр, 3 – бункер, 4 – каналы, 5 – зонные кольцевые нагреватели, 6 – термопары, 7 – формующая головка, 8 – массивный корпус, 9 – механическая передача, 10 – патрубок для отвода охлаждающей воды, 11 – подшипниковый узел, 12 – электродвигатель

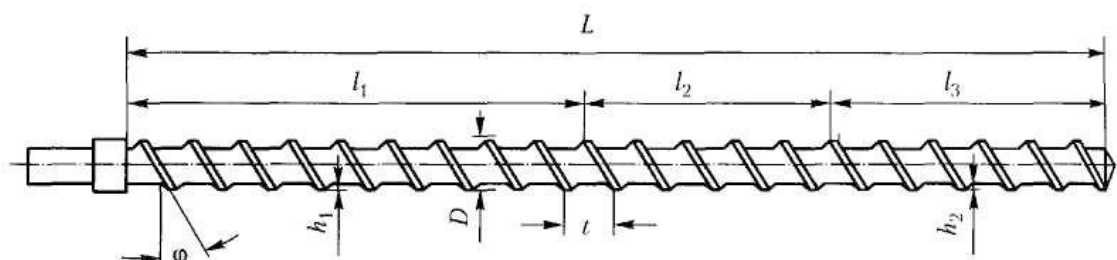


Рисунок 8 – Шнек экструдера однозаходный

D , мм – диаметр шнека с гребнем;

L , мм – длина шнека

z , мм – радиальный зазор между гребнями шнека и рабочим цилиндром;

$h_1 = h_2 = h_3$, мм – глубина винтового канала шнека (постоянная);

δ , мм – толщина гребня шнека;

t , мм – шаг винтовой нарезки шнека;

φ , ° – угол винтовой нарезки;

i – число заходов винтовой нарезки;

n , c^{-1} – частота вращения шнека;

L/D – отношение длины шнека к его диаметру;

l_1 – питающая зона шнека, м;

l_2 – зона сжатия шнека, м;

l_3 – зона нагнетания (дозирования) шнека, м.

Расчёт формующей головки экструдера

Экструзионная головка экструдера филамента состоит из трёх участков по ходу движения расплава полимера:

– цилиндрический участок L_1 ,

– конический участок L_2 ,

– цилиндрический участок L_3 .

Сопротивление канала формующей головки течению расплава определим как:

$$W = \frac{1}{k} [cm^3],$$

где k – коэффициент геометрической формы канала, который рассчитывается для каждого участка канала, а затем вычисляется суммарный коэффициент:

$$K_r = \frac{1}{\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \dots + \frac{1}{k_i}}$$

Коэффициент геометрической формы первого (цилиндрического) участка канала вычислим по формуле:

Коэффициент геометрической формы первого (конического) участка канала вычислим по формуле:

$$k_1 = \frac{\pi d^4}{128L} [\text{см}^3],$$

где d_1 – диаметр первого (цилиндрического) участка канала, см;
 L_1 – длина первого (цилиндрического) участка канала, см.

Коэффициент геометрической формы третьего (цилиндрического) участка канала вычислим по формуле:

$$k_2 = \frac{3\pi D^3 d^3}{128L(D^2 + Dd + d^2)} [\text{см}^3],$$

где D_2 и d_2 диаметры конуса на входе и выходе расплава, см;
 L_2 – длина второго участка канала, см.

Коэффициент геометрической формы третьего (сужающегося) участка канала вычислим по формуле:

$$k_3 = \frac{\pi d^4}{128L} [\text{см}^3],$$

где d_3 – диаметр первого (цилиндрического) участка канала, см;
 L_3 – длина третьего (цилиндрического) участка канала, см.

Рассчитав значения коэффициентов геометрической формы для всех участков, определим общий коэффициент геометрической формы канала, а затем вычислим сопротивление канала течению расплава.

Расчёт производительности экструдера

На производительность экструдера оказывают влияние следующие факторы:

- длина дозирующей зоны шнека;
- геометрические параметры шнека;
- число оборотов шнека;
- конструкция (сопротивление) формующей головки.

На основе гидродинамического подхода к анализу взаимодействия элементов экструдера с перерабатываемым материалом в дозирующей зоне экструдера различают три компонента потока движения расплава:

- прямой (вынужденный) поток, движущийся по межвитковому пространству в направлении от зоны загрузки к зоне дозирования вдоль оси шнека и возникающий вследствие вращения шнека относительно цилиндра;
- обратный поток расплава, движущийся в противоположном направлении и вызванный перепадом давления по длине шнека;

– поток утечек расплава, движущийся в зазоре между наружной поверхностью витков шнека и внутренней поверхностью материального цилиндра в направлении от зоны дозирования.

С учетом вышесказанного, объёмную производительность экструдера определим как:

$$Q = \frac{\alpha kn}{k + \beta + \gamma} [M^3/c],$$

где k – коэффициент геометрической формы канала формирующей головки;

n – частота вращения шнека, c^{-1} ;

α – константа прямого потока, M^3 ;

β – константа обратного потока, M^3 ;

γ – константа потока утечек, M^3 .

Константы прямого и обратного потоков расплавов, а также константу потока утечек определим, соответственно, по формулам:

$$\alpha = \frac{\pi D h (t - i \delta) \cos \varphi}{2} [M^3];$$

$$\beta = \frac{h^2 (t - i \delta) \cos 2\varphi}{24 l_3} [M^3];$$

$$\gamma = \frac{\pi^2 D^2 z^2 \tan \varphi \sin \varphi}{10 l_3 \delta} [M^3].$$

где t – шаг винтовой нарезки шнека, м;

h – глубина винтового канала, м;

i – число заходов винтовой нарезки;

δ – толщина гребня шнека, м;

$z = 0,001$ м – радиальный зазор между гребнем шнека и рабочим цилиндром;

D – диаметр шнека, м;

l_3 – длина зоны нагнетания (дозирования), м;

L – длина шнека, определяемая из отношения L/D , м;

φ – угол винтовой нарезки шнека, $^\circ$, который определим по формуле:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{t}{\pi D}\right) [^\circ],$$

где t – шаг винтовой нарезки шнека, мм.

Завершив расчеты констант α , β и γ , определим объёмную производительность экструдера с размерностью M^3/c , а затем ту же характеристику с размерностью $кг/ч$ по формуле:

$$Q' = 3600 \cdot Q \rho [кг/ч],$$

где $\rho = 780$ $кг/м^3$ – плотность расплава полипропилена при температуре 200 $^\circ C$ [6].

Объёмная производительность экструдера FDM/FFF 3D принтера является параметром, специфичным для каждого хотэнда, и варьируется в зависимости от используемого материала.

Объёмная производительность экструдера FDM/FFF 3D принтера связана с тремя переменными:

- диаметр сопла;
- высота слоя;
- максимальная скорость печати.

В простейшем виде объем измеряется длиной, шириной и высотой линии (рисунок 1).

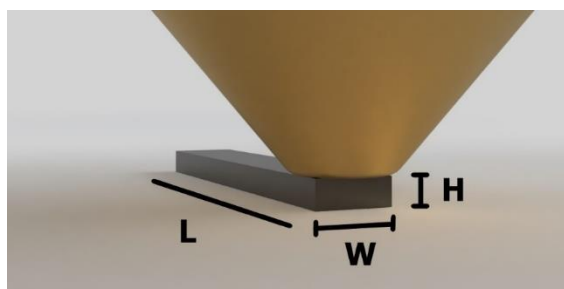


Рисунок 9 – Объем материала

Однако на самом деле нить не выдавливается таким образом и не является прямоугольной линией, как показано выше. Более точный способ представления линии изображен на рисунке 2 (обратите внимание на закругленные края линии).

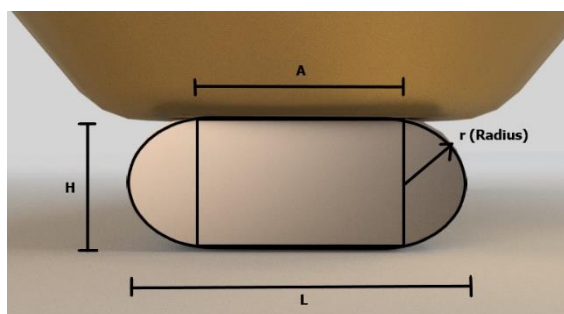


Рисунок 10 – Формула «стадиона»

Таким образом, более точная формула, учитывающая закругленный край выдавленной линии – это так называемая формула «стадиона»:

$$S = \pi \cdot r^2 + 2 \cdot r \cdot a \text{ [мм}^2\text{]},$$

где a – длина прямой стороны, мм;

r – радиус скругления, мм.

С учетом вышесказанного, объемную производительность экструдера определим как:

$$Q = S \cdot V \text{ [мм}^3\text{/с]},$$

где V – скорость печати, мм/с.

Соответственно, максимальная скорость печати ограничивается максимальной объемной скоростью, характерной для его экструдера.

Например, наиболее распространенная максимальная объемная производительность настольного принтера при печати ABS составляет около 10 мм³/с, что означает, что теоретическая максимальная скорость, с которой можно успешно печатать ABS, используя стандартную конфигурацию, основанную на высоте слоя 0,2 мм и сопле 0,4 мм будет всего 125 мм/с. Если мы также используем другую распространенную конфигурацию, например сопло 0,6 мм и высоту слоя 0,3 мм, максимальная скорость печати упадет до 55 мм/с. Использование более высоких скоростей повлечет за собой высокий риск пропуска экструзии и расслоения слоев.

2.2 Описание лабораторного стенда



Рисунок 11 – 3D принтер ЛенГрупп NEO

Таблица 5 – Технические характеристики 3D принтера ЛенГрупп NEO

Общие	
Производитель	ЛенГрупп
Модель	NEO
Страна	Россия

Основные	
Материал печати	Пластиковая нить
Технология печати	FDM/FFF
Корпус принтера	Открытый
Диаметр нити	1,75 мм
Кол-во печатающих сопел	1 шт.
Температура экструдера	до 260 °С
Температура стола	до 150 °С
Область печати	210x210x180 мм
Скорость печати / выращивания	до 150 мм/с
Толщина слоя	от 20 мкм
Подогреваемый стол	Да
Сопло	0,4 мм
Поддерживаемые материалы	PLA, PETG, ABS, SBS, HIPS, Nylon, TPU
Программное обеспечение	
Поддерживаемые форматы файлов	STL, OBJ
Совместимые ОС	Windows
Программное обеспечение	Ultimaker Cura, Repetier-Host
Дополнительная информация	
Интерфейс подключения	USB (Флеш-накопитель), USB (Кабель)
Электропитание	220V, 50Hz
Габаритные и вес	
Габариты товара	510x440x395мм
Вес нетто	7.5 кг

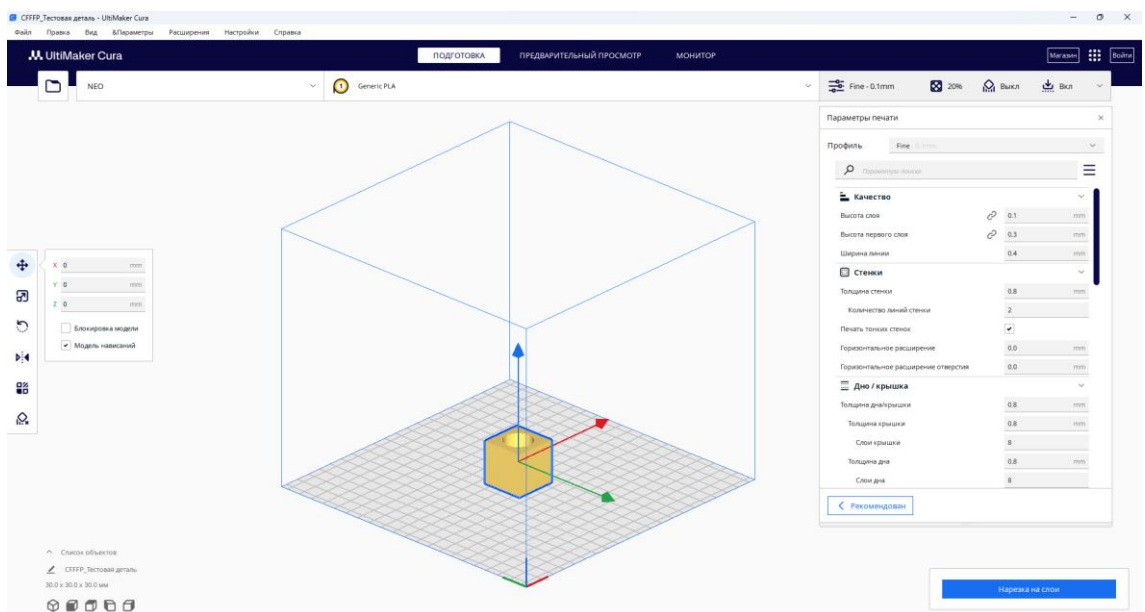


Рисунок 12 – ПО Ultimaker Cura 5.4.0



Рисунок 13 – Штангенциркуль ШЦ-1-125 0,1

3. Порядок выполнения работы

3.1 Ознакомиться с техникой безопасности и правилами поведения в лаборатории;

3.2 Выполнить расчеты в соответствии с заданием преподавателя;

3.3 Внимательно изучить устройство и правила эксплуатации 3D принтера;

3.4 Внимательно изучить ПО;

3.5 Выполнить 3D модель тестовой детали в соответствии с заданием преподавателя;

3.6 Подготовить 3D модель тестовой детали к 3D печати с помощью ПО в соответствии с заданием преподавателя;

3.7 Выполнить 3D печать тестовой детали;

3.8 Выполнить измерения тестовой детали с помощью штангенциркуля;

3.9 Сравнить расчетные и экспериментальные данные (размеры, время печати) (Таблица 6);

Таблица 6 – Форма сравнительной таблицы

Параметр	Расчетные данные	Экспериментальные данные	Вывод
Размеры			
Время печати			

3.10 Оформить отчет о выполнении практической работы.

4. Контрольные вопросы

4.1 Дайте определение технологии экструзии материала (material extrusion);

4.2 Какое оборудование используется для данного процесса?

4.3 Какое сырье используется для данного процесса?

4.4 Какой механизм связи используется для данного процесса?

4.5 Какой источник активации используется для данного процесса?

4.6 Какая вторичная обработка используется для данного процесса?

Практическая работа №4 «Изучение технологии DLP/LCD»

1. Цель работы

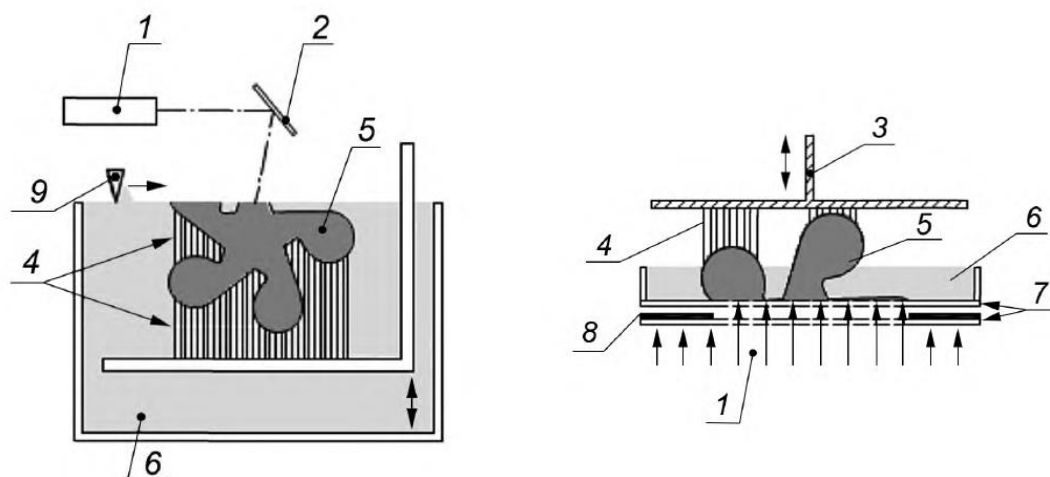
Изучение технологии DLP/LCD.

2. Общие положения

2.1 Краткие теоретические сведения

Фотополимеризация в ванне (vat photopolymerization) – процесс АП, в котором жидкий фотополимер выборочно отверждается (полимеризуется) в ванне световым излучением [1].

Процесс фотополимеризации в ванне приведен на рисунке 14.



а) Фотополимеризация в ванне с помощью лазера

б) Фотополимеризация в ванне с помощью управляемого источника ультрафиолетового излучения

Рисунок 14 – Схема двух альтернативных принципов для фотополимеризации в ванне: 1 – источник света; 2 – установленное под углом зеркало, фокусирующее падающий на него свет; 3 – строительная платформа и подъемник; 4 – поддерживающая структура; 5 – получаемый продукт; 6 – ванна, заполненная фотополимеризующимся составом; 7 – прозрачные пластины; 8 – фотошаблон; 9 – перекрытие и механизм выравнивания поверхности

Для данного процесса необходимо следующее оборудование: источник света; установленное под углом зеркало, фокусирующее падающий на него свет; строительная платформа и подъемник; ванна, заполненная фотополимеризующимся составом; прозрачные пластины; перекрытие и механизм выравнивания поверхности [2].

Сырье: жидкое или пастообразное: фотореакционноспособная смола с наполнителем или без него.

Механизм связи: химическая реакция.

Источник активации: ультрафиолетовое излучение от лазеров или ламп.

Вторичная обработка: чистка, поддержка удаленного материала после отверждения путем дальнейшего воздействия ультрафиолетового излучения [3].

DLP (Digital Light Processing) – один из методов стереолитографической 3D-печати, который использует цифровые светодиодные проекторы. В отличие от SLA-установок, сканирующих поверхность материала одним или несколькими лазерными головками, DLP-принтеры проецируют изображение целого слоя до затвердевания фотополимерной смолы, после чего наносится новый слой материала и проецируется изображение нового слоя цифровой модели.

Также на рынке представлены 3D-принтеры с технологиями LCD/LSL (Liquid Crystal Display / LED Screen Light), в основе которых также лежит фотополимеризация. Засветка фотополимерной смолы осуществляется светодиодной ультрафиолетовой матрицей через маску ЖК-экрана (см. схему), а не УФ-проектора, как в технологии DLP. [7].

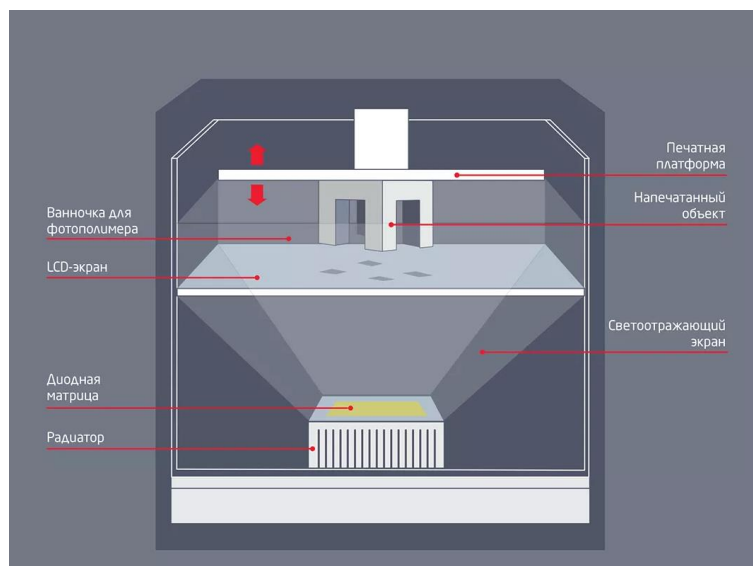


Рисунок 15 – Схема процесса DLP/LCD

Модели, напечатанные на стереолитографических принтерах, имеют самое высокое разрешение и точность, самую четкую детализацию и самую гладкую поверхность по сравнению с другими технологиями 3D-печати из пластмасс. 3D-печать с использованием полимеров – отличный вариант для изготовления высокдетализированных прототипов, требующих жестких допусков и гладких поверхностей, таких как пресс-формы, шаблоны и функциональные модели. Модели, напечатанные по технологии DLP/LCD, легко поддаются полировке и (или) покраске после печати, в результате чего можно получить готовые изделия с высокой детализацией.

Модели, напечатанные на 3D-принтерах по технологии DLP/LCD, как правило, *изотропны*: их прочность более или менее постоянна и не зависит от ориентации, поскольку химические связи возникают между каждым слоем. Это позволяет получить модели с предсказуемыми механическими характеристиками, критически важными для таких целей, как производство крепежных и зажимных приспособлений, готовых изделий, а также функциональных прототипов [5].

Таблица 7 – Материалы технологии DLP/LCD

Материалы	Характеристики	Применение
Стандартные полимеры	Высокое разрешение Гладкая, матовая поверхность	Концептуальные модели Реалистичные прототипы

Clear Resin	<p>Единственный по-настоящему прозрачный материал для 3D-печати из пластмасс</p> <p>Можно отполировать практически до полной оптической прозрачности</p>	<p>Модели, которые должны быть оптически прозрачными</p> <p>Миллифлюидные устройства</p>
Draft Resin	<p>Один из самых «быстрых» материалов для 3D-печати</p> <p>Печать происходит в 4 раза быстрее по сравнению со стандартными полимерами и в 10 раз быстрее по сравнению с технологией FDM</p>	<p>Исходные прототипы</p> <p>Быстрые итерации</p>
Tough Resin и Durable Resin	<p>Жесткие, прочные, функциональные и динамичные материалы</p> <p>Способны выдерживать сжатие, растяжение, сгибание и удары, не разрушаясь</p> <p>Различные материалы со свойствами, схожими с АБС и ПЭ</p>	<p>Корпуса и кожухи</p> <p>Зажимные и крепежные приспособления</p> <p>Соединительные устройства</p> <p>Износостойкие прототипы</p>
Полимеры Rigid	<p>Высоконаполненный, жесткий и прочный материал, устойчивый к сгибанию</p> <p>Устойчивый к воздействию температуры и химических веществ</p> <p>Сохраняет размер под нагрузкой</p>	<p>Зажимные и крепежные приспособления, инструментальная оснастка</p> <p>Турбины и лопасти вентиляторов</p> <p>Компоненты для подачи жидкости/воздуха</p> <p>Электрические кожухи и корпуса, используемые в автомобильной промышленности</p>
High Temp Resin	<p>Устойчивый к воздействию высокой температуры</p> <p>Высокая точность</p>	<p>Компоненты для подачи горячего воздуха, газа и жидкости</p> <p>Термостойкие крепления, корпуса и крепежные приспособления</p> <p>Пресс-формы и вставки</p>
Flexible Resin и Elastic Resin	<p>Гибкость резины, ТПУ или силикона</p> <p>Устойчивый к сгибанию и сжатию</p> <p>Выдерживает множество последовательных циклов, не изнашиваясь</p>	<p>Прототипы потребительских товаров</p> <p>Сгибаемые структуры для робототехники</p> <p>Медицинские устройства и анатомические модели</p> <p>Реквизит и модели для спецэффектов</p>

Медицинские и стоматологические полимеры	Широкий спектр биосовместимых полимеров для изготовления медицинских и стоматологических изделий	Стоматологические и медицинские изделия, в том числе хирургические шаблоны, зубные протезы и протезы конечностей
Ювелирные полимеры	Материалы для литья по выплавляемым моделям и с помощью вулканизированной резины Легко поддается литью, позволяя создавать замысловатые элементы, и хорошо сохраняет форму	Изделия для примерки Модели для многоцветных пресс-форм Ювелирные украшения на заказ
Ceramic Resin	Поверхность, похожая на текстуру камня Возможность обжига для создания настоящего керамического изделия	Технические изыскания Уникальные предметы искусства

Радикальная полимеризация является очень распространенным методом получения полимеров в промышленности.

При радикальной полимеризации активным центром является свободный радикал. Его возникновение в реакционной системе возможно различными способами (нагреванием, облучением, химическими добавками и др.).

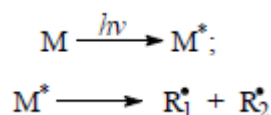
Инициирование – это реакция, в результате которой возникает радикал.

Возникновение свободного радикала всегда связано с затратой значительного количества энергии, которое должно быть сообщено молекуле. В зависимости от способа образования радикалов, начинающих реакцию, различают:

- чисто термическое инициирование;
- фотохимическое;
- радиационное;
- механохимическое;
- химическое (под действием специально добавленных веществ – инициаторов).

Фотохимическое инициирование – процесс образования свободных радикалов из мономерных молекул при действии света определенной длины.

Молекула мономера поглощает квант световой энергии и переходит в возбужденное (триплетное) состояние. После чего происходит гомолитический распад возбужденной молекулы мономера на радикалы.



Фотоиницирование без добавления специальных веществ возможно для тех мономеров, которые имеют основную полосу поглощения в ультрафиолетовой области (стирол и его производные, метилметакрилат).

Из электронного спектра поглощения (рисунок 1) видно, что стирол имеет основную полосу поглощения при длине волны 250 нм, следовательно, для фотоиницирования стирола необходима лампа жесткого ультрафиолета (УФ).

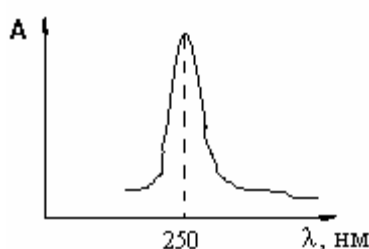
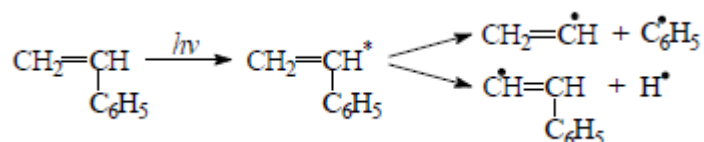


Рисунок 16 – Электронный спектр поглощения стирола

Распад молекулы стирола после поглощения квантов света на радикалы происходит следующим образом:



Эффективность фотоиницирования зависит от различных факторов: длины волны ультрафиолетового излучения, строения мономера, наличия растворителей и т.д.

Энергия активации при фотоиницировании (E_a обычно менее 17 кДж/моль) значительно ниже, чем при термическом инициировании, поэтому скорость её не зависит от температуры, она растет с увеличением интенсивности облучения.

Скорость фотохимического инициирования:

$$V_{\text{и}} = f \cdot I_a,$$

где I_a – интенсивность поглощенного света, т.е. число квантов света, поглощенных в единицу времени на единицу объема;

f – число пар радикалов, образовавшихся при поглощении одного кванта света (таблица 1).

Таблица 8 – Эффективность фотоиницирования (квантовый выход) некоторых мономеров

Мономер	Эффективность инициирования при $\lambda = 310$ нм	Эффективность инициирования при других λ
метилметакрилат	0,1	0,01 (260 нм)
метилакрилат	0,1	–
винилацетат	0,01	–
стирол	0,001	0,08 (365 нм)
изопрен	–	10^{-4} – 10^{-5} (290–365 нм)

Величина f зависит от длины волны и природы мономера.

$$I_a = \varepsilon \cdot I_0 \cdot [M],$$

где ε – молярный коэффициент поглощения (коэффициент экстинкции);

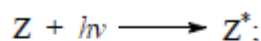
I_0 – интенсивность света, падающего на мономер;

$[M]$ – концентрация мономера в системе, где $[M] = c \cdot l$.

$$V_{и} = f \cdot \varepsilon \cdot I_0 \cdot [M],$$

из уравнения видно, что $V_{и} \sim [M]$.

Если мономер не поглощает свет с данной длиной волны, в этом случае нужно использовать специальные вещества – фотосенсибилизаторы (Z), которые увеличивают чувствительность мономера к свету:



M^* – далее разлагается с образованием радикалов.

В качестве фотосенсибилизаторов часто используются

бензофенон , полигалогениды CCl_4 , C_2Cl_6 и др [8].

Применение в качестве фотосенсибилизаторов красителей позволяет использовать для фотоиницирования видимую область света.

В практических целях фотополимеризация обычно проводится в присутствии фотоинициаторов - веществ, распадающихся в требуемой области УФ-спектра с достаточно высоким квантовым выходом. В качестве фотоинициаторов могут быть использованы некоторые термические инициаторы, например, пероксиды или азосоединения, а также другие соединения. Наиболее эффективными фотоинициаторами являются ароматические кетоны и их производные, благодаря достаточно широкой области поглощения УФ-спектра и высокому квантовому выходу радикалов. В промышленности в качестве фотоинициаторов используют бензоин, бензилкеталь и их многочисленные производные.

Фотополимеризация используется для нанесения полимерных покрытий непрерывным способом на металл, дерево, керамику, световоды, в стоматологии для отверждения композиций зубных пломб. Особенно следует отметить применение фотополимеризации в фотолитографии, с помощью которой изготавливают большие интегральные схемы в микроэлектронике, а также печатные платы (матрицы) в современной технологии фотонабора, позволяющей исключить использование свинца.

Существенным недостатком фотоинициирования является быстрое падение его эффективности с увеличением толщины облучаемого слоя вследствие поглощения излучения. По этой причине фотохимическое инициирование эффективно при возбуждении полимеризации в достаточно тонких слоях, порядка нескольких миллиметров.

2.2 Описание лабораторного стенда

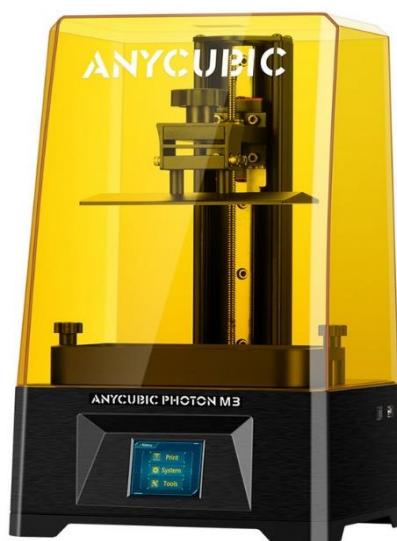


Рисунок 17 – 3D принтер Anycubic Photon M3

Таблица 9 – Технические характеристики 3D принтера Anycubic Photon M3

Общие	
Производитель	Anycubic
Модель	Photon M3
Страна	Китай
Основные	
Материал печати	Фотополимерная смола
Технология печати	LCD/LED

Область печати	180x163,9x102,4
Скорость печати / выращивания	50 мм/ч
Диагональ матрицы	7.6 дюйма
Тип матрицы	LCD Mono
Разрешение матрицы	4K+, (4098x2400) px
Длина УФ-волны	405 нм
Поддерживаемые материалы	фотополимерные смолы
Программное обеспечение	
Поддерживаемые форматы файлов	STL, OBJ
Совместимые ОС	Windows, Mac OS, Linux
Программное обеспечение	Anycubic Photon Workshop, ChituBox
Дополнительная информация	
Интерфейс подключения	USB (Кабель), Wi-Fi
Электропитание	220V, 50Hz
Габаритные и вес	
Габариты товара	269x256x425 мм
Вес нетто	7 кг

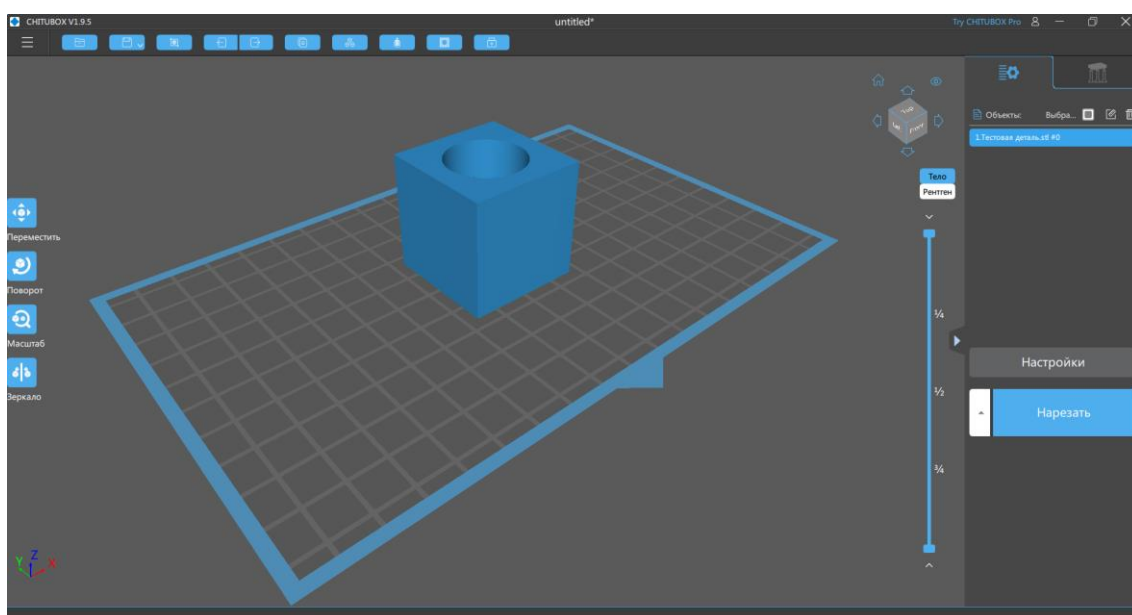


Рисунок 18 – ПО CHITUBOX 1.9.5



Рисунок 19 – Штангенциркуль ШЦ-1-125 0,1

3. Порядок выполнения работы

3.1 Ознакомиться с техникой безопасности и правилами поведения в лаборатории;

3.2 Выполнить расчеты в соответствии с заданием преподавателя;

3.3 Внимательно изучить устройство и правила эксплуатации 3D принтера;

3.4 Внимательно изучить ПО;

3.5 Выполнить 3D модель тестовой детали в соответствии с заданием преподавателя;

3.6 Подготовить 3D модель тестовой детали к 3D печати с помощью ПО в соответствии с заданием преподавателя;

3.7 Выполнить 3D печать тестовой детали;

3.8 Выполнить измерения тестовой детали с помощью штангенциркуля;

3.9 Сравнить расчетные и экспериментальные данные (размеры, время печати) (Таблица 10);

Таблица 10 – Форма сравнительной таблицы

Параметр	Расчетные данные	Экспериментальные данные	Вывод
Размеры			
Время печати			

3.10 Оформить отчет о выполнении практической работы.

4. Контрольные вопросы

4.1 Дайте определение технологии фотополимеризации в ванне (vat photopolymerization);

4.2 Какое оборудование используется для данного процесса?

4.3 Какое сырье используется для данного процесса?

4.4 Какой механизм связи используется для данного процесса?

4.5 Какой источник активации используется для данного процесса?

4.6 Какая вторичная обработка используется для данного процесса?

Практическая работа №5 «Изучение технологии DED/WAAM»

1. Цель работы

Изучение технологии DED/WAAM.

2. Общие положения

2.1 Краткие теоретические сведения

Прямой подвод энергии и материала (directed energy deposition) – процесс АП, в котором энергия от внешнего источника используется для соединения материалов путем их сплавления в процессе нанесения.

Примечание – Источник энергии (например, лазер, электронный луч, плазма и др.) используют для полного или неполного расплавления наносимых материалов [1].

Процесс прямого подвода энергии и материала приведен на рисунке 20.

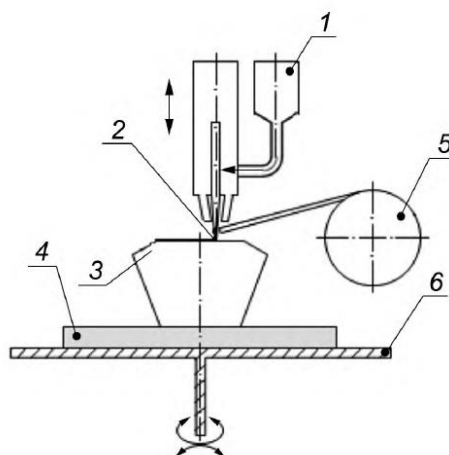


Рисунок 20 – Схема процесса прямого подвода энергии и материала: 1 – бункер с порошком; 2 – направленный луч энергии, например, лазер, электронный или плазменно-дуговой пучок; 3 – получаемый продукт; 4 – подложка; 5 – проволока (нить) катушки; 6 – строительный стол

Для данного процесса необходимо следующее оборудование: бункер с порошком, подложка, строительный стол [2].

Примечания:

1) Перемещение в системе координат (обычно оси 3-6) достигается путем перемещения сопла и строительного стола.

2) Альтернативные системы подачи материала, например: порошок подается через энергетический луч, порошок подается в координату энергии, нити накала (провода), подаваемой в координату энергии.

Сырье: порошок или проволока, как правило, из металла; для определенных применений к основному веществу могут быть добавлены керамические частицы.

Механизм связи: термическая реакция связывания – плавление и застывание.

Источник активации: лазер, электронный луч или плазма.

Вторичная обработка: улучшение состояния поверхности, например: механическая обработка, микровзрывные работы, лазерное оплавление, шлифовка или полировка и улучшение свойств материала (например, термообработка) [3].

Технология DED-W/WAAM/3DMP (Wire Direct Energy Deposition/Wire Arc Additive Manufacturing/3D Metal Print) – это печать металлической проволокой, при которой используется метод дуговой сварки. Техпроцесс начинается с подготовки САД-данных и передачи геометрии модели в программное обеспечение для создания управляющей программы. Далее она приводит в движение блок с горелкой, расплавляется проволока. Наплавка происходит в среде инертного/активного газа или в многокомпонентных газовых смесях в зависимости от типа наплавляемого материала: аргона, аргон-гелиевой смеси, смеси на основе аргона и двуокиси углерода и др. [9].



Рисунок 21 – Схема процесса WAAM

Технология WAAM имеет большой потенциал в крупномасштабном промышленном производстве из-за низкой стоимости и высокой эффективности. Есть литературные данные о снижении стоимости при использовании электродугового выращивания на 20-79% по сравнению с технологиями, использующими лазерный и электронный лучи. Сопоставление же стоимости электродугового выращивания с фрезерной обработкой целесообразно при $VTF > 5$ (buy to fly – соотношение массы начальной заготовки к массе уже готового изделия). Соответственно, чем больше VTF, тем больше экономический эффект от применения электродугового выращивания.

Таблица 11 – Материалы технологии DED/WAAM

Материалы	Характеристики	Применение
Св-08 Св-10Г2 Св-08ГС Св-12ГС Св-08Г2С	НВ 120...160 НВ 180...210 НВ 180...200 НВ 190...220 НВ 180...210	Оси, шпиндели, валы, опорные ролики
Св-18ХГС	НВ 240...300	Опорные ролики, натяжные колеса гусеничных тракторов, цапфы, оси катков
Св-20Х13 Св-10Х17Т	HRC 42...48 HRC 30...38	Уплотнительные поверхности общепромышленной арматуры, работающей при температурах до 450 °С
Св-06Х19Н9Т Св-08Х19Н9Ф2С2	НВ 160... 190 НВ 200...230	Уплотнительные поверхности запорной арматуры для пара и воды
Нп-25, Нп-30, Нп-35 Нп-40, Нп-45 Нп-50 Нп-65 Нп-80 Нп-40Г	НВ 160...220 НВ 170...230 НВ 180...240 НВ 220...300 НВ 260...340 НВ 180...240	Детали, работающие в условиях трения металла по металлу (оси, валы, шпиндели)
Нп-50Г Нп-65Г Нп-40Х13	НВ 200...270 НВ 230...310 HRC 45... 52	Натяжные колеса и опорные ролики гусеничных машин, крановые колеса, оси опорных роликов
Нп-40Х2Г2М Нп-50ХФА	HRC 54...56 после закалки HRC 43...50	Детали машин, работающие с динамическими нагрузками (шлицевые и коленчатые валы, поворотные кулаки и т. п.)

Нп-30ХГСА Нп-30Х5 Нп-50ХНМ Нп-50Х6ФМС Нп-105Х Нп-45Х2В8Г Нп-60Х3В10Ф Нп-45Х4В3ГФ	НВ 200...300 HRC 37...42 HRC 40...50 HRC 42...48 HRC 32...38 HRC 40...46 HRC 42...50 HRC 38...45	Прокатные валки и кузнечно-прессовый инструмент
Нп-40Х3Г2МФ	HRC 38...44	Детали, испытывающие удары и абразивное изнашивание
Нп-Г13А	НВ 220...280	Детали из сталей типа 110Г13Л
Нп-20Х14	HRC 32...38	Уплотнительные поверхности задвижек для пара и воды
Нп-30Х13	HRC 38...45	Плунжеры гидропрессов, шейки коленчатых валов, штампы
Нп-30Х10Г10Т	НВ 200...220	Лопасты гидротурбин, гребные винты, гребные валы морских судов
Нп-Х15Н60	НВ 180...220	Детали печей и реторт, работающие при высокой температуре
Нп-Х20Н80Т	НВ 180...220	Выхлопные клапаны автомобильных двигателей
Нп-03Х15Н35Г7М6Б	-	Корпуса сосудов в атомно-энергетическом и химическом машиностроении

При сварке и наплавке в среде защитных газов в зону горения дуги под небольшим давлением подается газ, который вытесняет воздух из этой зоны и защищает сварочную ванну от кислорода и азота воздуха.

В зависимости от применяемого газа сварка разделяется на сварку в активных (CO_2 , H_2 , O_2 , и др.) и инертных (He , Ar , $\text{Ar}+\text{He}$ и др.) газах. Сварку (наплавку) можно осуществлять как плавящимся, так и неплавящимся электродами.

Наибольшее распространение при восстановлении деталей подвижного состава получили сварка и наплавка в среде углекислого газа (CO_2) – сварка плавящимся электродом (проволокой) с защитой сварочной ванны от воздуха углекислым газом. Такой способ является самым дешевым при сварке углеродистых и низколегированных сталей. Поэтому по объему производства он занимает одно из первых мест среди механизированных способов сварки плавлением.

При сварке (наплавке) в среде углекислого газа (рисунок 22) из сопла горелки 2, охватывающей поступающую в зону горения дуги электродную проволоку 4, вытекает струя защитного газа 6, оттесняет воздух из сварочной ванны.

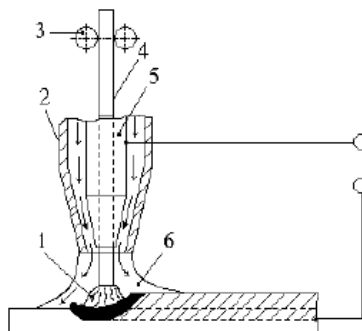


Рисунок 22 – Дуговая сварка в защитном газе плавящимся электродом: 1 – электрическая дуга; 2 – газовое сопло; 3 – подающие ролики; 4 – электродная проволока; 5 – токоподводящий мундштук; 6 – защитный газ

Однако в процессе сварки углекислый газ под действием высоких температур диссоциирует: $2\text{CO}_2 \leftrightarrow 2\text{CO} + \text{O}_2$. Поэтому сварка идет не в чистом углекислом газе, а в смеси газов CO_2 , CO и O_2 . В этом случае обеспечивается практически полная защита расплавленного металла от азота воздуха, но сохраняется почти такой же окислительный характер газовой смеси, каким он был бы при сварке голой проволокой без защиты от атмосферы воздуха.

Следовательно, при сварке и наплавке в среде CO_2 необходимо предусматривать меры по раскислению наплавляемого металла.

Эта задача решается использованием сварочных проволок диаметром 0,8..2 мм, в состав которых входят элементы раскислители. Чаще всего это кремний (0,6..1,0%) и марганец (1..2%).

Образующиеся в процессе раскисления окислы кремния и марганца всплывают на поверхность сварочной ванны и после кристаллизации металла удаляются.

Наибольшее распространение при сварке в среде CO_2 нашли электродные проволоки Св-08ГС, Св-08Г2С, Св-10ГС, Св-18ХГС и др.

Кроме проволок сплошного сечения, часто используются порошковые проволоки типа ПП-АН4, ПП-АН5, ПП-АН8, ПП-3Х2В8Т и др.

Сварка в среде CO₂ имеет целый ряд преимуществ:

- минимальную зону структурных изменений металла при высокой степени концентрации дуги и плотности тока;
- большую степень защиты сварочной ванны от воздействия внешней среды; существенную производительность;
- возможность наблюдения за формированием шва;
- возможность сваривать металл различной толщины (от десятых долей до десятков миллиметров), производить сварку в различных пространственных положениях, механизировать, автоматизировать технологический процесс;
- незначительную чувствительность к ржавчине и другим загрязнителям основного металла.

Однако при выборе данного способа сварки и наплавки необходимо иметь ввиду и его недостатки:

- сильное разбрызгивание металла при токе больше 500 А, что требует постоянной защиты и очистки сопла горелки;
- интенсивное излучение открытой мощной дуги, требующее защиты сварщика;
- необходимость охлаждения горелки при значительных токах;
- осуществление сварки практически только на постоянном токе;
- наличие специальной проволоки [10].

Расчет сварочного тока, А, при сварке проволокой сплошного сечения производится по формуле:

$$I_{св} = \frac{\pi d_3^2 a}{4},$$

где a – плотность тока в электродной проволоке, А/мм² (при сварке в CO₂ $a = 110..130$ А/мм²);

d_3 – диаметр электродной проволоки, мм.

Напряжение дуги и расход углекислого газа, В, выбираются в зависимости от силы сварочного тока по таблице 12.

Таблица 12 – Зависимость напряжения и расхода углекислого газа от силы сварочного тока

Сила сварочного тока, А	50..60	90..100	150..160	220..240	280..300	360..380	430..450
Напряжение дуги, В	17..18	19..20	21..22	25..27	28..30	30..32	32..34
Расход CO ₂ , л/мин	8..10	8..10	9..10	15..16	15..16	18..20	18..20

При сварочном токе 200..250 А длина дуги должна быть в пределах 1,5..4,0 мм. Вылет электродной проволоки составляет 8..15 мм (уменьшается с повышением сварочного тока).

Скорость подачи электродной проволоки, м/ч, рассчитывается по формуле:

$$V_{\text{пр}} = \frac{4 \cdot \alpha_p \cdot I_{\text{св}}}{\pi \cdot d_3^2 \cdot \rho}$$

где α_p – коэффициент расплавления проволоки, г/А·ч;

$I_{\text{св}}$ – сварочный ток, А;

d_3 – диаметр электродной проволоки, мм;

ρ – плотность металла проволоки (для стали $j = 7,8$ г/см³).

Значение α_p рассчитывается по формуле:

$$\alpha_p = 3,0 + 0,08 \frac{I_{\text{св}}}{d_3}$$

или выбирается по графику зависимости α_p от диаметра электродной проволоки и режима сварки в углекислом газе (рисунок 23).

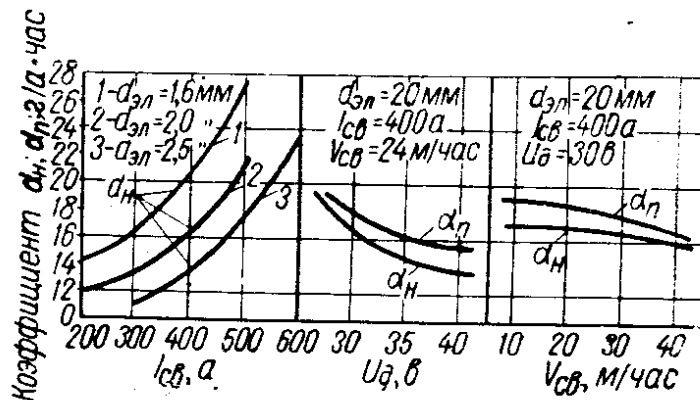


Рисунок 23 – Зависимость коэффициентов расплавления (α_p) и наплавки (α_n) от диаметра электродной проволоки и режима сварки в углекислом газе

Скорость сварки (наплавки), м/ч, рассчитывается по формуле:

$$V_{\text{св}} = \frac{\alpha_n \cdot I_{\text{св}}}{100 F_b \cdot \rho}$$

где α_n – коэффициент наплавки, г/А·ч, $\alpha_n = \alpha_p \cdot (1 - \psi)$, где ψ – коэффициент потерь металла на угар и разбрызгивание. При сварке в $\text{CO}_2 = 0,1..0,15$;

F_B – площадь поперечного сечения одного валика, $см^2$. При наплавке в CO_2 принимается равным $0,3..0,7 см^2$.

2.2 Описание лабораторного стенда

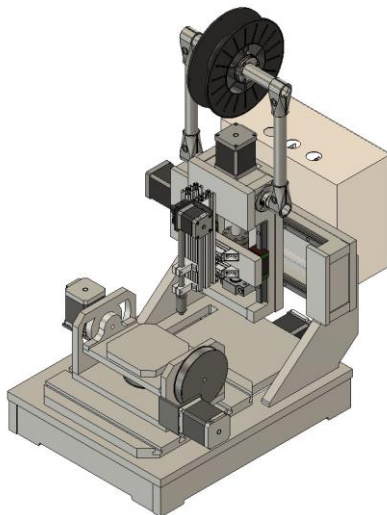


Рисунок 24 – 3D принтер ЮЗГУ WAAM

Таблица 13 – Технические характеристики 3D принтера ЮЗГУ WAAM

Общие	
Производитель	ЮЗГУ
Модель	WAAM
Страна	Россия
Основные	
Материал печати	Сварочная, наплавочная проволока
Технология печати	WAAM
Источник тока	Сварочный полуавтомат КЕДР MIG-160 GDM
Диаметр проволоки	0,8-1,2 мм
Кол-во сварочных головок	1 шт.
Защитный газ	смесь аргон-углекислый газ, аргон, углекислый газ, гелий
Температура стола	до 150 °С
Область печати	100x100x100 мм
Скорость печати / выращивания	до 300 мм/мин
Толщина слоя	от 2 мм
Количество координат	5
Сопло	14-22 мм

Поддерживаемые материалы	СВ-08Г2С
Программное обеспечение	
Поддерживаемые форматы файлов	STL, OBJ
Совместимые ОС	Windows
Программное обеспечение	Grbl Gru
Дополнительная информация	
Интерфейс подключения	USB (Кабель)
Электропитание	220V, 50Hz
Габаритные и вес	
Габариты товара	510x440x395мм
Вес нетто	7.5 кг

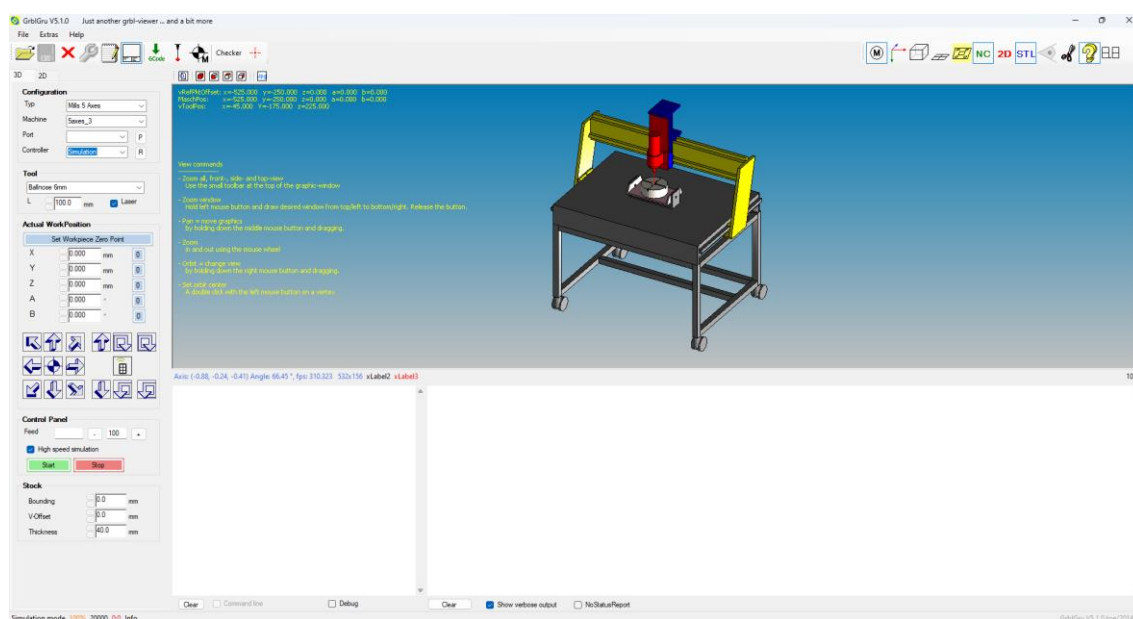


Рисунок 25 – ПО GrblGru v5.1.0



Рисунок 26 – Штангенциркуль ШЦ-1-125 0,1

3. Порядок выполнения работы

3.1 Ознакомиться с техникой безопасности и правилами поведения в лаборатории;

3.2 Выполнить расчеты в соответствии с заданием преподавателя;

3.3 Внимательно изучить устройство и правила эксплуатации 3D принтера;

3.4 Внимательно изучить ПО;

3.5 Выполнить 3D модель тестовой детали в соответствии с заданием преподавателя;

3.6 Подготовить 3D модель тестовой детали к 3D печати с помощью ПО в соответствии с заданием преподавателя;

3.7 Выполнить 3D печать тестовой детали;

3.8 Выполнить измерения тестовой детали с помощью штангенциркуля;

3.9 Сравнить расчетные и экспериментальные данные (размеры, время печати) (Таблица 14);

Таблица 14 – Форма сравнительной таблицы

Параметр	Расчетные данные	Экспериментальные данные	Вывод
Размеры			
Время печати			

3.10 Оформить отчёт о выполнении практической работы.

4. Контрольные вопросы

4.1 Дайте определение технологии прямого подвода энергии и материала (directed energy deposition);

4.2 Какое оборудование используется для данного процесса?

4.3 Какое сырье используется для данного процесса?

4.4 Какой механизм связи используется для данного процесса?

4.5 Какой источник активации используется для данного процесса?

4.6 Какая вторичная обработка используется для данного процесса?

Библиографический список

1. ГОСТ Р 57558-2017. Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 1. Термины и определения;
2. ГОСТ Р 57588-2017. Оборудования для аддитивных технологических процессов. Общие требования;
3. ГОСТ Р 57589-2017. Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 2. Материалы для аддитивных технологических процессов. Общие требования;
4. Метод послойного наплавления материала (FDM) [Электронный ресурс] : <https://iqb.ru/materials-and-technologies/technologies/fdm/> (дата обращения: 10.07.2023);
5. Руководство по материалам для 3D-печати: типы, способы применения и свойства [Электронный ресурс] : <https://formlabs.com/ru/blog/3d-printing-materials/> (дата обращения: 10.07.2023);
6. Крыжановский, В. К. Производство изделий из полимерных материалов [Текст] : учебное пособие / В. К. Крыжановский, М. Л. Кербер, В. В. Бурлов, А.Д. Паниматченко. – СПб.: Профессия, 2004. – 464 с.;
7. DLP/LCD-стереолитография [Электронный ресурс] : <https://iqb.ru/materials-and-technologies/technologies/lcd/> (дата обращения: 10.07.2023);
8. Осипова, Г.В. Химия и физика полимеров: ч. 1 [Текст] : учебное пособие / Г.В. Осипова, Г.Н. Беспалова; Иван. гос. хим.-технол. ун-т. – Иваново, 2010. 132 с.;
9. Технология 3DMP/WAAM [Электронный ресурс] : https://www.ddmlab.ru/technology/waam_technology/ (дата обращения: 10.07.2023);
10. Бабенко, Э.Г. Технологические процессы сварки, наплавки, обработки сплавов резанием и давлением [Текст] : учебное пособие / Э.Г. Бабенко. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2011. – 105 с.