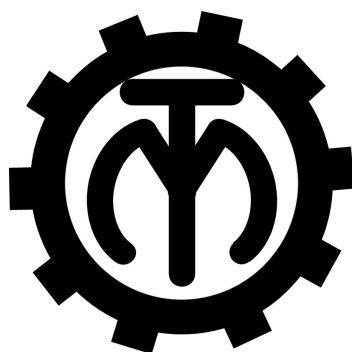


МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Технология машиностроения»

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ТРЕХМЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

*Методические рекомендации к практическим занятиям
для студентов специальности
6-05-0722-05 «Производство изделий на основе
трехмерных технологий»
очной формы обучения*



Могилев 2026

УДК 621.91
ББК 34.6
О22

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Технология машиностроения» «23» февраля 2026 г.,
протокол № 9

Составитель Е. Ю. Демиденко

Рецензент канд. техн. наук А. С. Федосенко

Методические рекомендации к практическим занятиям предназначены для студентов специальности 6-05-0722-05 «Производство изделий на основе трехмерных технологий» очной формы обучения. Изложены теоретические положения в области проектирования оборудования для трехмерных технологий, включая 3D-принтеры и станки с ЧПУ.

Учебное издание

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ТРЕХМЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Ответственный за выпуск	М. А. Рабыко
Корректор	А. А. Подошевка
Компьютерная верстка	М. М. Дударева

Подписано в печать 25.04.2026. Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. 0,93. Уч.-изд. л. 0,94. Тираж 26 экз. Заказ № 309.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2026

Содержание

1 Практическая работа № 1. Проектирование параметров FDM 3D-принтера.....	4
2 Практическая работа № 2. Проектирование параметров металлорежущего станка с ЧПУ.....	8
3 Практическая работа № 3. Проектирование параметров SLM 3D-принтера.....	10
4 Практическая работа № 4. Проектирование параметров вспомогательного оборудования для трехмерных технологий.....	13
Список литературы.....	15

1 Практическая работа № 1. Проектирование параметров FDM 3D-принтера

Цель работы: приобретение практических навыков расчета элементов кинематической схемы FDM 3D-принтера.

1.1 Примеры решения задач

Пример 1

Дано:

- точность позиционирования оси Z (минимальная высота слоя): $\Delta_Z = 0,12$ мм;
- шаг винта шарико-винтовой передачи (ШВП): $P_{ШВП} = 6$ мм;
- минимальный микрошаг драйвера: $MS = 1/8$ (8 микрошагов на один полный шаг);
- количество полных шагов двигателя за один оборот: $N_{полн} = 200$.

Необходимо проверить, можно ли достичь требуемой точности позиционирования оси Z при заданных параметрах.

Решение

1 Расчет перемещения за один микрошаг:

$$\Delta_{\text{микро}} = \frac{P_{\text{ШВП}}}{N_{\text{полн}} \cdot \frac{1}{MS}}, \quad (1.1)$$

$$\Delta_{\text{микро}} = \frac{6}{200 \cdot 8} = 0,00375 \text{ мм.}$$

2 Проверка условия $\Delta_{\text{микро}} \leq \Delta_Z$:

$$0,00375 \text{ мм} < 0,12 \text{ мм.}$$

Минимальное перемещение за один микрошаг значительно меньше требуемой высоты слоя – условие точности выполняется.

3 Проверка достижимости (целое число микрошагов):

$$n_{\text{микро}} = \frac{\Delta_Z}{\Delta_{\text{микро}}}, \quad (1.2)$$

$$n_{\text{микро}} = \frac{0,12}{0,00375} = 32.$$

Вывод. Задача решается. Параметры привода оси Z (шаг винта, микрошаг драйвера двигателя) позволяют точно реализовать высоту слоя 0,12 мм без погрешности позиционирования. Высота слоя 0,12 мм достигается точно за 32 микрошага, погрешность при этом будет отсутствовать.

Пример 2

Дано:

- точность позиционирования осей X (Y): $\Delta_{XY} = 0,01$ мм;
- количество зубьев шкива ременной передачи: $Z_{шкив} = 16$;
- шаг ременной передачи: $P_{РП} = 3$ мм;
- минимальный микрошаг драйвера: $MS = 1/8$;
- количество полных шагов двигателя за один оборот: $N_{полн} = 200$.

Необходимо проверить, можно ли достичь требуемой точности позиционирования оси X (Y) при заданных параметрах.

Решение

1 Длина окружности шкива ременной передачи:

$$L_{шкив} = Z_{шкив} \cdot P_{РП}, \quad (1.3)$$

$$L_{шкив} = 16 \cdot 3 = 48 \text{ мм.}$$

2 Расчет перемещения за один микрошаг:

$$\Delta_{микро} = \frac{L_{шкив}}{N_{полн} \cdot \frac{1}{MS}}, \quad (1.4)$$

$$\Delta_{микро} = \frac{48}{200 \cdot 8} = 0,03 \text{ мм.}$$

3 Проверка условия $\Delta_{микро} \leq \Delta_{XY}$:

$$0,03 \text{ мм} > 0,01 \text{ мм.}$$

Минимальное перемещение больше требуемой точности. Это означает, что даже один микрошаг сдвигает рабочий орган оси X (Y) на 0,03 мм, что превышает допустимую погрешность 0,01 мм. Задача невыполнима.

Вывод. Задача нерешается при заданных параметрах. Для достижения требуемой точности 0,01 мм необходимо:

- использовать шкив с большим количеством зубьев;
- применить ремень с меньшим шагом;
- перейти на более мелкий микрошаг.

1.2 Порядок выполнения работы

1 Получить у лаборанта (инженера) или преподавателя методические материалы и индивидуальное задание согласно таблицам 1.1 и 1.2.

2 Рассчитать точность позиционирования (минимальную высоту слоя) оси Z FDM 3D-принтера с шаговым двигателем.

3 Рассчитать точность позиционирования оси X (Y) FDM 3D-принтера с шаговым двигателем.

4 Сделать выводы по результатам расчетов.

Таблица 1.1 – Варианты индивидуального задания для расчета оси Z FDM 3D-принтера

Вариант	Точность позиционирования (минимальная высота слоя) Δz , мм	Параметры привода	
		Шаг винта ШВП $P_{ШВП}$, мм	Минимальный микрошаг драйвера MS
1	0,10	8	1/4
2	0,02	5	1/16
3	0,05	12	1/5
4	0,002	2	1/32
5	0,001	4	1/4
6	0,10	10	1/8
7	0,02	8	1/1
8	0,002	3	1/4
9	0,05	6	1/10
10	0,001	2	1/64

Таблица 1.2 – Варианты индивидуального задания для расчета оси X (Y) FDM 3D-принтера

Вариант	Точность позиционирования Δxy , мм	Параметры привода		
		Количество зубьев шкива $Z_{шкив}$, мм	Шаг ременной передачи $P_{РП}$, мм	Минимальный микрошаг драйвера MS
1	0,10	20	2	1/1
2	0,02	24	2	1/10
3	0,05	36	2	1/4
4	0,002	20	2,5	1/32
5	0,001	16	3	1/8
6	0,10	40	2	1/5
7	0,02	20	4	1/16
8	0,002	24	2	1/64
9	0,05	20	2	1/8
10	0,001	16	5	1/32

1.3 Типовое содержание отчета по практической работе

- 1 Наименование и цель практической работы.
- 2 Расчет параметров оси Z FDM 3D-принтера с шаговым двигателем.
- 3 Расчет параметров осей X и Y FDM 3D-принтера с шаговым двигателем.
- 4 Ответы на контрольные вопросы.
- 5 Выводы.

Контрольные вопросы

- 1 Какие основные параметры FDM 3D-печати (толщина слоя, температура экструдера, скорость печати) влияют на качество изделия и как их правильно подбирать?
- 2 Как выбор материала (PLA, ABS, PETG и др.) влияет на настройки печати и механические свойства готовой детали?
- 3 Какие методы оптимизации конструкции и поддержек можно применить для снижения деформаций и перерасхода материала?

2 Практическая работа № 2. Проектирование параметров металлорежущего станка с ЧПУ

Цель работы: приобретение практических навыков расчета элементов кинематической схемы металлорежущего станка с ЧПУ.

2.1 Теоретические сведения

В сервосистемах разрешение позиционирования (дискретность) определяется по формуле

$$\Delta_{серво} = \frac{P_{ШВП}}{N_{общ}}, \quad (2.1)$$

где $\Delta_{серво}$ – разрешение позиционирования, мм;

$P_{ШВП}$ – шаг ходового винта, мм;

$N_{общ}$ – общее разрешение энкодера.

Общее разрешение для инкрементального энкодера (импульсов на оборот)

$$N_{общ} = N_{энк} \cdot K, \quad (2.2)$$

где $N_{энк}$ – базовое разрешение энкодера (импульсов на оборот);

K – коэффициент умножения (интерполяции) сигналов энкодера.

Общее разрешение для sin/cos-энкодера с интерполяцией (периодов на оборот)

$$N_{общ} = N_{энк} \cdot K, \quad (2.3)$$

где $N_{энк}$ – базовое разрешение энкодера (периодов на оборот);

K – коэффициент умножения (интерполяции) сигналов энкодера.

Общее разрешение для абсолютного энкодера (позиций на оборот)

$$N_{общ} = 2^{N_{энк}}, \quad (2.4)$$

где $N_{энк}$ – базовое разрешение энкодера (битность).

2.2 Порядок выполнения работы

1 Получить у лаборанта (инженера) или преподавателя методические материалы и индивидуальное задание согласно таблице 2.1.

2 Рассчитать точность позиционирования оси X (Y) металлорежущего станка с ЧПУ с сервоприводом. Сравнить полученное значение с паспортным значением станка.

3 Сделать выводы по результатам расчетов.

Таблица 2.1 – Варианты индивидуального задания для расчета оси X (Y) металлорежущего станка с ЧПУ

Вариант	Точность позиционирования Δ_{xy} , мм	Параметры привода				Паспортная точность станка Δ_n , мм
		Шаг винта ШВП $P_{ШВП}$, мм	Тип энкодера	Разрешение энкодера $N_{энк}$	Коэффициент умножения K	
1	0,005	5	Инкрементальный	2048	4	0,01
2	0,001	5	Инкрементальный	1024	4	0,005
3	0,002	10	Абсолютный	17	–	0,005
4	0,0005	4	sin/cos-энкодер с интерполяцией	512	1024	0,002
5	0,01	6	Инкрементальный	2500	4	0,02
6	0,02	8	Абсолютный	13	–	0,01
7	0,008	5	Инкрементальный	2048	2	0,015
8	0,003	4	sin/cos-энкодер с интерполяцией	2048	256	0,005
9	0,015	10	Абсолютный	15	–	0,02
10	0,0002	2	sin/cos-энкодер с интерполяцией	1024	4096	0,001

2.3 Типовое содержание отчета по практической работе

- 1 Наименование и цель практической работы.
- 2 Расчет параметров оси X (Y) металлорежущего станка с ЧПУ.
- 3 Ответы на контрольные вопросы.
- 4 Выводы.

Контрольные вопросы

1 Какие факторы (скорость резания, подача, глубина резания) необходимо учитывать при настройке режимов обработки для разных материалов?

2 Как правильно выбрать инструмент (фрезу, резец) и стратегию обработки (черновая, чистовая) для минимизации времени и повышения точности?

3 Какие методы контроля и коррекции параметров обработки применяются для предотвращения брака и износа инструмента?

3 Практическая работа № 3. Проектирование параметров SLM 3D-принтера

Цель работы: приобретение практических навыков расчета элементов кинематической схемы SLM 3D-принтера.

3.1 Теоретические сведения

SLM (Selective Laser Melting) – технология аддитивного производства, при которой металлический порошок полностью расплавляется сфокусированным лазерным лучом, формируя плотную монолитную деталь. Качество готового изделия определяется совокупностью параметров, которые можно разделить на три группы: энергетические параметры, геометрические параметры, параметры среды.

Энергетические параметры:

- мощность лазера P , Вт;
- скорость сканирования v , мм/с.

Геометрические параметры:

- расстояние между соседними проходами лазера (шаг сканирования) h , мм;
- толщина слоя t , мм;
- диаметр пятна лазера d , мм.

Параметры среды:

- температура подогрева платформы;
- состав и расход защитного газа (аргон, азот);
- содержание остаточного кислорода.

Совместное влияние энергетических и геометрических параметров описывается объемной плотностью энергии VED , Дж/мм³, следующим образом:

$$VED = \frac{P}{v \cdot h \cdot t}. \quad (3.1)$$

Объемная плотность энергии (Volumetric Energy Density) – это ключевой расчетный параметр в SLM-технологии, который используется для характеристики количества энергии лазера, подаваемой на единицу объема материала.

Недостаточная энергия (слишком низкий VED) приводит к неполному расплавлению частиц порошка. Это вызывает повышенную пористость, ухудшение механических свойств и может привести к «шарообразованию» (balling effect), когда расплавленный металл собирается в капли вместо того, чтобы формировать ровный трек.

Чрезмерная энергия (слишком высокий VED) может привести к переходу в так называемый «режим замочной скважины» (keyhole mode). В этом режиме лазер прожигает глубокую ванну расплава, вызывая испарение металла и захват газовых пузырьков, что парадоксальным образом тоже увеличивает пористость.

С ростом VED плотность отпечатанных образцов может увеличиваться, но при этом может снижаться предел прочности. Однако, несмотря на свою популярность, VED является упрощенным параметром. Исследования предостерегают от его использования в качестве единственного инструмента для точной настройки технологии SLM-печати.

Один и тот же показатель VED можно получить при совершенно разных комбинациях параметров, которые будут давать детали с отличающейся микроструктурой и свойствами. Поэтому VED используется как отправная точка для поиска подходящего режима или для грубого сравнения различных исследований, но окончательная оптимизация параметров всегда требует экспериментальной проверки и анализа микроструктуры.

Линейная плотность энергии LED , Дж/мм, определяется по формуле

$$LED = \frac{P}{v}. \quad (3.2)$$

Проверка по коэффициенту перекрытия:

$$K_{пер} = \frac{d-h}{d} \cdot 100 \%. \quad (3.3)$$

Если шаг штриховки будет больше диаметра пятна, то между соседними треками будут зазоры – несплавление. Даже при достаточной энергии в центре пятна краевые зоны будут не перекрываться. Следовательно, если коэффициент перекрытия имеет отрицательное значение, то это означает что печать будет иметь зазоры, что недопустимо.

Производительность Q , см³/ч, вычисляется по формуле

$$Q = v \cdot h \cdot t \cdot 3600 \cdot 10^{-3}. \quad (3.4)$$

3.2 Порядок выполнения работы

1 Получить у лаборанта (инженера) или преподавателя методические материалы и индивидуальное задание согласно таблице 3.1.

2 Рассчитать объемную плотность энергии VED , Дж/мм³, по исходным данным. Рассчитать линейную плотность энергии LED , Дж/мм, по исходным данным. Сравнить полученные значения с оптимальными диапазонами для данного материала по таблице 3.2. Оценить, обеспечит ли данный режим полное проплавление (отсутствие пор) или приведет к перегреву. Произвести проверку по коэффициенту перекрытия. Рассчитать производительность процесса (скорость построения).

3 Сделать выводы по результатам расчетов.

Таблица 3.1 – Варианты индивидуального задания

Вариант	Материал	Мощность лазера P , Вт	Скорость сканирования v , мм/с	Толщина слоя t , мкм	Диаметр пятна d , мкм	Шаг сканирования h , мм
1	Сталь 316L	250	800	50	80	0,1
2	Ti6Al4V	280	700	40	70	0,09
3	AlSi10Mg	400	1500	60	100	0,15
4	Inconel 718	320	600	30	60	0,08
5	CoCr	180	500	50	70	0,12
6	Сталь 18Ni-300	270	750	45	80	0,1
7	CuCrZr	500	600	40	100	0,12
8	Inconel 625	220	800	40	70	0,11
9	Сталь H13	280	650	35	75	0,09
10	CP Ti Grade 2	200	900	40	80	0,12

Таблица 3.2 – Справочные данные к индивидуальному заданию

Материал	Объемная плотность энергии (оптимальный диапазон) VED , Дж/мм ³	Линейная плотность энергии (оптимальный диапазон) LED , Дж/мм
Сталь 316L	50...80	0,3...0,7
Ti6Al4V	40...70	0,35...0,55
AlSi10Mg	25...45	0,20...0,40
Inconel 718	60...100	0,5...0,9
CoCr	50...90	0,4...0,7
Сталь 18Ni-300	70...110	0,4...0,8
CuCrZr	60...100	0,5...0,9
Inconel 625	50...90	0,5...0,9
Сталь H13	60...100	0,4...0,8
CP Ti Grade 2	40...70	0,35...0,55

3.3 Типовое содержание отчета по практической работе

- 1 Наименование и цель практической работы.
- 2 Расчет параметров печати SLM 3D-принтера.
- 3 Ответы на контрольные вопросы.
- 4 Выводы.

Контрольные вопросы

- 1 Какие параметры лазерного спекания (мощность лазера, скорость сканирования, толщина слоя) критичны для качества металлических деталей?
- 2 Как свойства металлического порошка (размер частиц, состав) влияют на выбор режимов печати и конечные характеристики изделия?
- 3 Какие конструктивные особенности (ориентация детали в камере, поддержки) необходимо учитывать для минимизации остаточных напряжений и деформаций?

4 Практическая работа № 4. Проектирование параметров вспомогательного оборудования для трехмерных технологий

Цель работы: приобретение практических навыков расчета параметров вспомогательного оборудования для трехмерных технологий.

4.1 Теоретические сведения

Вибрационные сепараторы (вибросита) классифицируют сыпучие материалы по крупности частиц за счет возвратно-поступательных колебаний просеивающей поверхности. Для металлических порошков, используемых в SLM-технологии, критически важно обеспечить высокую эффективность просеивания и предотвратить агломерацию частиц.

Для эффективного просеивания металлического порошка вибрационная сепаратор должна обеспечивать следующее.

1 Ускорение просеивания

$$a = (0,8...1,5) \cdot g. \quad (4.1)$$

2 Производительность Q не ниже требуемой $Q_{\text{треб}}$.
Ускорение просеивания (в долях g)

$$K = \frac{a}{g} = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot n^2 \cdot A}{g \cdot 3600} \approx 0,00112 \cdot n^2 \cdot A, \quad (4.2)$$

где n – частота вибраций, мин^{-1} ;

A – амплитуда вибраций, мм.

Производительность вибросита (упрощенно)

$$Q = 0,5 \cdot F \cdot q \cdot \rho, \quad (4.3)$$

где F – площадь сита, м^2 ;

q – удельная производительность, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$;

ρ – насыпная плотность, $\text{т}/\text{м}^3$.

Принимаем $q = 0,25 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ для всех материалов.

4.2 Порядок выполнения работы

1 Получить у лаборанта (инженера) или преподавателя методические материалы и индивидуальное задание согласно таблице 4.1.

2 Рассчитать ускорение просеивания K . Сравнить полученное значение со значением по формуле (4.1). Рассчитать производительность вибросита Q .

Сравнить полученное значение с требуемым значением для данного материала $Q_{\text{треб}}$ по таблице 4.1.

3 Сделать выводы по результатам расчетов.

Таблица 4.1 – Варианты индивидуального задания

Вариант	Материал	Насыпная плотность ρ , т/м ³	Частота вибраций n , мин ⁻¹	Амплитуда вибраций A , мм	Площадь сита F , м ²	Требуемая производительность $Q_{\text{треб}}$, кг/ч
1	316L	2,8	1800	1,8	0,5	50
2	Ti64	2,5	1500	2,5	0,4	30
3	AlSi10Mg	1,4	1200	3	0,6	40
4	CoCr	3,2	2000	1,2	0,3	25
5	In718	3	2500	1	0,5	35
6	MS18Ni	2,9	2200	1,5	0,5	45
7	17-4PH	2,8	1800	2,5	0,7	60
8	CuCrZr	3,5	1600	2,2	0,8	70
9	CP-Ti	2,4	2000	2	0,3	20
10	Ni-alloy	3,1	2800	1,2	0,5	55

4.3 Типовое содержание отчета по практической работе

- 1 Наименование и цель практической работы.
- 2 Расчет параметров вибросита.
- 3 Ответы на контрольные вопросы.
- 4 Выводы.

Контрольные вопросы

1 Какие виды вспомогательного оборудования (системы постобработки, камеры охлаждения, установки для удаления поддержек) применяются в 3D-печати и как их выбирать?

2 Как параметры дополнительных устройств (например, подогрев платформы, система подачи инертного газа) влияют на процесс аддитивного производства?

3 Какие методы автоматизации и интеграции вспомогательного оборудования в производственную линию можно использовать для повышения эффективности?

Список литературы

- 1 **Гибсон, Я.** Технологии аддитивного производства : пер. с англ. / Я. Гибсон, Д. Розен, Б. Стакер. – М. : Техносфера, 2020. – 648 с. : ил.
- 2 **Ляпков, А. А.** Полимерные аддитивные технологии : учеб. пособие / А. А. Ляпков, А. А. Троян. – СПб. ; М. ; Краснодар : Лань, 2022. – 120 с. : ил.
- 3 **Основы аддитивных технологий и производств** : учеб. пособие / М. А. Гейко, И. О. Леушин, А. В. Нищенков [и др.] ; под общ. ред. И. О. Леушина. – М. ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2024. – 228 с.
- 4 **Тарасова, Т. В.** Аддитивное производство : учеб. пособие / Т. В. Тарасова. – М. : ИНФРА-М, 2025. – 196 с.
- 5 **Технологическое обеспечение машиностроительного производства** : учеб. пособие / В. А. Логвин, Ж. А. Мрочек, Е. В. Банковская [и др.] ; под ред. Ж. А. Мрочека. – Мн. : РИВШ, 2021. – 560 с.
- 6 **Берлинер, Э. М.** САПР конструктора-машиностроителя : учебник / Э. М. Берлинер, О. В. Таратынов. – М. : Форум ; ИНФРА-М, 2019. – 288 с. : ил.