

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
Учреждение образования  
«Витебский государственный технологический университет»

## МЕХАНИКА МАТЕРИАЛОВ АДДИТИВНОГО СИНТЕЗА

Методические указания по выполнению практических работ  
для студентов специальности  
1-36 07 02 «Производство изделий на основе трехмерных технологий»  
дневной формы обучения

Витебск  
2020

УДК 004.9 (076)

Составитель:

В. П. Довыденкова

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом УО «ВГТУ», протокол № 1 от 10.09.2020.

**Механика материалов аддитивного синтеза** : методические указания по выполнению практических работ / сост. В. П. Довыденкова. – Витебск : УО «ВГТУ», 2020. – 35 с.

Методические указания содержат задания и рекомендации по их выполнению к шести практическим работам по курсу «Механика материалов аддитивного синтеза» и предназначены для изучения курса и самостоятельной работы студентов специальности 1-36 07 02 «Производство изделий на основе трехмерных технологий» дневной формы обучения.

УДК 004.9 (076)

© УО «ВГТУ», 2020

## СОДЕРЖАНИЕ

Практическая работа 1. Векторы и тензоры.....	4
Практическая работа 2. Тензор напряжений. Тензор деформаций.....	8
Практическая работа 3. Задачи теории упругости. ....	12
Практическая работа 4. Вязкоупругие деформации. ....	14
Практическая работа 5. Изучение дефектов 3D-печати, возникающих при использовании термопластичных материалов.. ....	15
Практическая работа 6. Составления технического задания на выполнение опытно-конструкторских или научно-исследовательских работ .....	16
Практическая работа 7. Характеристика и выбор материала для 3D-печати. Разработка технического предложения на выполнение опытно-конструкторской или научно-исследовательской работы.....	19
Практическая работа 8. Разработка рабочей документации для 3D-печати. Подготовка 3D-модели для печати.....	21
Практическая работа 9. Прогнозирование свойств изделий или материалов аддитивного синтеза.....	29
Список использованных источников .....	34

# ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА 1

## ВЕКТОРЫ И ТЕНЗОРЫ

**Цель работы:** освоение приемов векторного и тензорного исчисления.

### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Решение примеров и задач векторного анализа [1, 2].
2. Решение прикладных задач с применением элементов тензорного исчисления [1, 2].

### МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

#### 1.1 Решение примеров и задач векторного анализа [1, 2].

**Задача 1.** Найти скалярное произведение векторов  $\vec{a}$  и  $\vec{b}$ , если их длины  $|\vec{a}|=n$  и  $|\vec{b}|=m$ , а угол между векторами равен  $60^\circ$ .

**Задача 2.** Найти скалярное произведение векторов  $\vec{p} = \vec{a} + n \cdot \vec{b}$  и  $\vec{q} = n \cdot \vec{a} - m \cdot \vec{b}$ , если их длины  $|\vec{a}|=n$  и  $|\vec{b}|=m$ , а угол между векторами  $\vec{a}$  и  $\vec{b}$  равен  $60^\circ$ .

#### Методические указания к решению задачи

Геометрическая интерпретация: скалярное произведение двух векторов  $\vec{a}$  и  $\vec{b}$  – это скалярная величина, равная произведению модулей этих векторов, умноженного на косинус угла между ними:

$$\vec{a} \cdot \vec{b} = |\vec{a}| \cdot |\vec{b}| \cdot \cos \alpha.$$

**Задача 3.** Найти скалярное произведение векторов  $\vec{a} = \{a_x; a_y\}$  и  $\vec{b} = \{b_x; b_y\}$ .

#### Методические указания к решению задачи

Алгебраическая интерпретация: скалярное произведение двух векторов  $\vec{a}$  и  $\vec{b}$  – это скалярная величина, равная сумме попарного произведения координат:

нат векторов  $\bar{a}$  и  $\bar{b}$ .

$$\bar{a} \cdot \bar{b} = a_x \cdot b_x + a_y \cdot b_y$$

**Задача 4.** Найти смешанное произведение векторов  $\bar{a} = \{a_x; a_y; a_z\}$  и  $\bar{b} = \{b_x; b_y; b_z\}$ ;  $\bar{c} = \{c_x; c_y; c_z\}$ .

**Задача 5.** Найти объем пирамиды, построенной на векторах  $\bar{a} = \{a_x; a_y; a_z\}$  и  $\bar{b} = \{b_x; b_y; b_z\}$ ;  $\bar{c} = \{c_x; c_y; c_z\}$ .

#### Методические указания к решению задачи

Смешанное произведение трех векторов  $\bar{a} = \{a_x; a_y; a_z\}$  и  $\bar{b} = \{b_x; b_y; b_z\}$ ;  $\bar{c} = \{c_x; c_y; c_z\}$  в декартовой системе координат – это скаляр, значение которого можно вычислить следующим образом:

$$\bar{a} \cdot (\bar{b} \times \bar{c}) = \begin{vmatrix} a_x & a_y & a_z \\ b_x & b_y & b_z \\ c_x & c_y & c_z \end{vmatrix}.$$

Объем пирамиды определяется:

$$V = \frac{1}{6} |\bar{a} \cdot [\bar{b} \times \bar{c}]|.$$

**Задача 6.** Доказать, что три вектора  $\bar{a} = \{a_x; a_y; a_z\}$ ,  $\bar{b} = \{b_x; b_y; b_z\}$  и  $\bar{c} = \{c_x; c_y; c_z\}$  компланарны.

#### Методические указания к решению задачи

Необходимым и достаточным условием компланарности трех векторов является равенство нулю их смешанного произведения:

$$\bar{a} \cdot (\bar{b} \times \bar{c}) = 0$$

**Задача 7.** Доказать, что три вектора  $\bar{a} = \{a_x; a_y\}$ ,  $\bar{b} = \{b_x; b_y\}$  и  $\bar{c} = \{c_x; c_y\}$  коллинеарны.

### Методические указания к решению задачи

Два вектора  $\bar{a} = \{a_x; a_y\}$ ,  $\bar{b} = \{b_x; b_y\}$  коллинеарны, если отношения их соответствующих коэффициентов равны:

$$\frac{a_x}{b_x} = \frac{a_y}{b_y}$$

**Задача 8.** Разложить вектор  $\bar{a} = \{a_x; a_y\}$  по базисным векторам  $\bar{b} = \{b_x; b_y\}$  и  $\bar{c} = \{c_x; c_y\}$

### Методические указания к решению задачи

Чтобы разложить вектор  $\bar{a}$  по базисным векторам  $\bar{b}$  и  $\bar{c}$ , необходимо найти коэффициенты  $x_1$  и  $y_1$ , при которых линейная комбинация векторов  $\bar{b}$  и  $\bar{c}$  равна вектору  $\bar{a}$ .

$$x_1 \cdot \bar{b} + y_1 \cdot \bar{c} = \bar{a}.$$

Коэффициенты  $x_1$  и  $y_1$  будут координатами вектора  $\bar{a}$  в базисе  $\bar{b}, \bar{c}$ .

Для нахождения коэффициентов  $x_1$  и  $y_1$  необходимо составить систему уравнений согласно указанному выражению.

## **1.2 Решение прикладных задач с применением элементов тензорного исчисления [1, 2]**

**Задача 9.** В некоторой системе координат  $A$  известны компоненты вектора  $\bar{a} = \{a_x; a_y; a_z\}$ . В системе координат  $A'$ , полученной из  $A$  поворотом на угол  $\varphi$  вокруг оси  $z$ , известны компоненты вектора  $\bar{b}' = \{b'_x; b'_y; b'_z\}$ . Найти скалярное произведение этих векторов.

### Методические указания к решению задачи

1. Построить матрицу поворота системы координат вокруг оси  $z$  на угол  $\varphi$ .
2. Используя закон обратного преобразования вектора (см. лекцию по теме: «Векторы и тензоры»), определить компоненты вектора  $\bar{b}$  в системе  $A$ .

3. Определить скалярное произведение векторов  $\vec{a}$  и  $\vec{b}$  (см. аналогичное решение задачи 3).

4. Самостоятельно решить следующую задачу: найти скалярное произведение векторов  $\vec{a}'$  и  $\vec{b}'$  в системе координат  $A'$ .

**Задача 10.** Пусть в исходной декартовой системе координат известны компоненты тензора второго ранга  $A_{ij}$ , заданные матрицей:

$$A = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}.$$

Необходимо найти компоненты этого тензора в системе координат, повернутой вокруг оси  $z$  на угол  $\varphi$ .

#### Методические указания к решению задачи

1. Построить матрицу поворота системы координат вокруг оси  $z$  на угол  $\varphi$ .

2. Используя закон преобразования тензора (см. лекцию по теме: «Векторы и тензоры»), определить компоненты тензора второго ранга  $A_{ij}'$ .

3. Самостоятельно решить обратную следующую задачу: в системе координат, повернутой вокруг оси  $z$  на угол  $\varphi$ , известны компоненты тензора  $A_{ij}'$ , заданные матрицей:

$$A' = \begin{vmatrix} a_{11}' & a_{12}' & a_{13}' \\ a_{21}' & a_{22}' & a_{23}' \\ a_{31}' & a_{32}' & a_{33}' \end{vmatrix}.$$

Необходимо найти компоненты этого тензора  $A_{ij}$  в старой системе координат.

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА 2

### ТЕНЗОР НАПРЯЖЕНИЙ. ТЕНЗОР ДЕФОРМАЦИЙ

**Цель работы:** освоение приемов вычисления напряжений на площадках и при одноосном растяжении.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Решение примеров и задач вычисления напряжений на площадках и при одноосном растяжении [1–3].

#### МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

**Задача 1.** Для плоского напряженного состояния, при котором известны значения  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$ , построить тензор напряжений, указать его компоненты на рисунке 2.1 и вычислить инварианты тензора напряжений.

#### Методические указания к решению задачи

1. Запись тензора напряжений в матричной форме имеет вид:

$$T_{\sigma} = \begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_x & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yx} & \sigma_z \end{vmatrix} .$$

2. Компоненты тензора напряжений указать на рисунке 2.1.

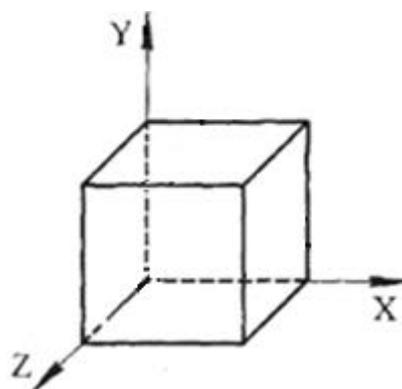


Рисунок 2.1 – Для решения задачи 1

3. Инварианты тензора напряжений определяются по формулам:

$$I_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$$

$$I_2 = \sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x - \tau_{xy}^2 - \tau_{yz}^2 - \tau_{zx}^2$$

$$I_3 = \sigma_x \sigma_y \sigma_z + 2\tau_{xy} \tau_{yz} \tau_{zx} - \sigma_x \tau_{yz}^2 - \sigma_y \tau_{zx}^2 - \sigma_z \tau_{xy}^2$$

**Задача 2.** Для заданного напряженного состояния при известных значениях  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$  определить нормальное и касательное напряжение на площадке, параллельной оси  $Z$  и наклоненной, как показано на рисунке 2.2.

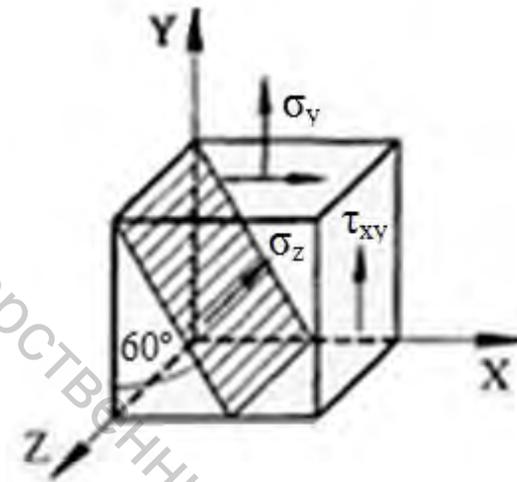


Рисунок 2.2 – Для решения задачи 2

### Методические указания к решению задачи

1. Определить углы наклона площадки к осям  $x, y, z$ . Следует помнить, что угол наклона площадки к оси определяется углом наклона ее нормали к этой оси.
2. Определить полное, нормальное и касательное напряжение в площадке. Значение составляющих полного напряжения определяется по формулам:

$$S_x = \sigma_x \cos \alpha + \tau_{xy} \cos \beta + \tau_{xz} \cos \gamma$$

$$S_y = \tau_{xy} \cos \alpha + \sigma_y \cos \beta + \tau_{yz} \cos \gamma$$

$$S_z = \tau_{xz} \cos \alpha + \tau_{yz} \cos \beta + \sigma_z \cos \gamma$$

Полное напряжение определяется по формуле:

$$S^2 = S_x^2 + S_y^2 + S_z^2.$$

Для определения нормального напряжения воспользуйтесь зависимостью:

$$\sigma_n = \sigma_x \cos^2 \alpha + \sigma_y \cos^2 \beta + \sigma_z \cos^2 \gamma + 2\tau_{xy} \cos \alpha \cos \beta + 2\tau_{yz} \cos \beta \cos \gamma + 2\tau_{xz} \cos \alpha \cos \gamma$$

Касательное напряжение на площадке определяется по формуле:

$$\tau_n = \sqrt{S^2 - \sigma_n^2}.$$

**Задача 3.** Для заданного объема напряженного состояния (рис. 2.3) при известных значениях  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$ ,  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{yz}$ ,  $\tau_{zx}$  определить положение главных площадок и величину главных нормальных напряжений.

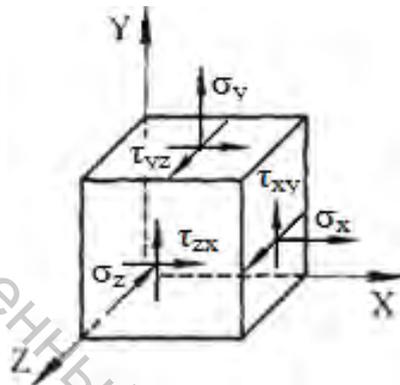


Рисунок 2.3 – Для решения задачи 3

### Методические указания к решению задачи

1. Для определения главных напряжений необходимо использовать характеристическое уравнение:

$$\sigma^3 - I_1 \sigma^2 + I_2 \sigma - I_3 = 0.$$

2. Коэффициенты уравнения, являющиеся инвариантами тензора напряжений, определить по формулам, приведенным в данной практической работе (задача 1).

3. Решив кубическое уравнение (п.1), определяем главные напряжения в соответствии с соотношением:

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3.$$

4. Положение главной площадки, в которой действует напряжение  $\sigma_1$ , расположенной по отношению к осям X-Y-Z под углами  $\alpha_1$ - $\beta_1$ - $\gamma_1$ , определяется любыми двумя уравнениями системы (20), приведенной в курсе лекций по теме: «Тензор напряжений» при условии, что  $\sigma = \sigma_1$ . Решение системы из трех уравнений с тремя неизвестными позволяет определить значение углов  $\alpha_1$ ,  $\beta_1$  и  $\gamma_1$ .

**Задача 4.** Стержень прямоугольного сечения с известным соотношением сторон  $L/M$  растянут вдоль оси силой  $P$ . Известно допустимое касательное напряжение для материала  $[\tau]$ . Определить размеры сечения.

**Методические указания к решению задачи**

1. Определить угол наклона площадки, при котором возникают наибольшие касательные напряжения.
2. Записать условие прочности, используя зависимость, приведенную в курсе лекций по теме: «Тензор деформаций».
3. Используя условие прочности и известную зависимость между напряжением, величиной прилагаемой нагрузки и площадью при одноосном растяжении, определяем длины сторон стержня  $L$  и  $M$ .

**Задача 5.** Кубик с известной высотой ребра ( $c$ ) был испытан на сжатие. При известном значении нагрузки ( $F$ ) он разрушился в плоскости, проходящей через диагональ верхней стороны и диагонали смежных вертикальных сторон, как показано на рисунке 2.4.

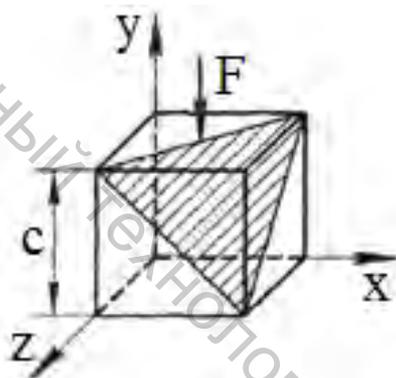


Рисунок 2.4 – Для решения задачи 5

Определить нормальное и касательное напряжение в этом сечении.

**Методические указания к решению задачи**

1. Определить значения главных нормальных напряжений при одноосном сжатии.
2. Напряжения на октаэдрических (равнонаклоненных к главным осям) площадках можно рассчитать по формулам:

$$\sigma_{\text{окт.}} = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$$

$$\tau_{\text{окт.}} = \frac{1}{3}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$$

# ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА 3

## ЗАДАЧИ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ

**Цель работы:** освоение алгоритма и приемов решения задач теории упругости.

### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Решение примеров и задач теории упругости [1–3].

### МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

**Задача 1.** Задана прямоугольная полоса-балка длиной  $l$ , высотой  $h$  и толщиной, равной 1 м (рис. 3.1). Необходимо:

- проверить, можно ли предложенную функцию  $\phi(x,y)$  принять для решения плоской задачи теории упругости;
- найти выражения для напряжений  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  и  $\tau_{xy}$ ;
- построить эпюры напряжений  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  и  $\tau_{xy}$  для сечений  $x=x_c$  и  $y=y_c$ ;
- определить внешние силы (нормальные и касательные), приложенные ко всем четырем граням полосы-балки.

При решении задачи выражения для функции напряжений  $\phi(x,y)$  и числовые значения выбрать из таблицы 3.1. Объемными силами пренебречь.

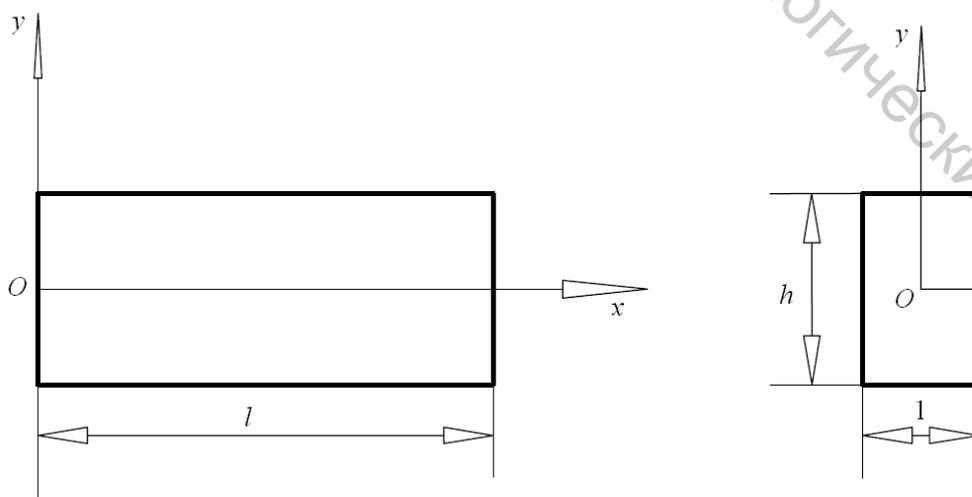


Рисунок 3.1 – Размеры прямоугольной полосы-балки для решения задачи

Таблица 3.1 – Выражения для функции напряжений  $\phi(x,y)$  и числовые значения для решения задачи по вариантам

№ строки	Функция напряжений $\phi(x,y)$	$a$	$b$	$l$	$h$	$x_c$	$y_c$
		M					
1	$a(x^4 - y^4) + bx^3y + xy^3$	1	1	5	1	1	0,2
2	$ax(x^2 + y^2) + bx^2y + xy$	2	1	6	1	2	0,3
3	$ay(x^2 + y^2) + bxy^2 + xy$	2	1	5	2	2	0,4
4	$ax^3 + bx^2y + xy^2 + xy$	1	2	6	1	2	0,3
5	$a(y^4 - x^4) + bxy^3 + x^2y$	1	2	6	2	2	0,5
6	$ax^4 - 3ax^2y^2 + bxy^3$	2	2	4	2	1	0,5
7	$ax^3y - 3bx^2y^2 + by^4$	2	1	4	2	1	0,5
8	$ax^4 - 3(a+b)x^2y^2 + by^4$	2	1	6	1	3	0,3
9	$axy^3 + x^3 + y^3 - bxy$	1	2	5	1	2	0,2
0	$ax^3y + 3bx^2y^2 - by^4$	2	1	5	2	2	0,4

### Методические указания к решению задачи

1. Предложенная для решения задачи теории упругости функция  $\phi(x,y)$  должна удовлетворять бигармоническому уравнению

$$\frac{\partial^4 \phi}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \phi}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \phi}{\partial y^4} = 0.$$

2. Выражения для напряжений  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  и  $\tau_{xy}$  можно определить по формулам:

$$\sigma_x = \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2}; \quad \sigma_y = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2}; \quad \tau_{xy} = -\frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial y}.$$

3. Для определения внешних сил (нормальных и касательных), приложенных ко всем четырем граням полосы-балки, используют статические граничные условия:

$$p_{xv} = \sigma_x \cos(x, v) + \tau_{xy} \cos(y, v)$$

$$p_{yv} = \tau_{yx} \cos(x, v) + \sigma_y \cos(y, v)$$

где  $p_{xv}$ ,  $p_{yv}$  – проекции на оси  $Ox$  и  $Oy$  внешних сил, действующих на гранях полосы-балки;  $v$  – нормаль к грани;  $\cos(x, v)$ ,  $\cos(y, v)$  – направляющие косинусы нормали  $v$ .

Для проверки найденных внешних сил можно использовать условия равновесия полосы-балки под их действием:

$$\sum X = 0; \quad \sum Y = 0; \quad \sum M_0 = 0;$$

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА 4

### ВЯЗКОУПРУГИЕ ДЕФОРМАЦИИ

**Цель работы:** освоение алгоритма и приемов решения задач с использованием механических моделей для описания вязкоупругости.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Решение примеров и задач с использованием механических моделей для описания вязкоупругости [1, 2].

#### МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

##### 4.1 Решение примеров и задач с использованием механических моделей для описания вязкоупругости

**Задача 1.** На рисунке 4.1 приведена реологическая схема модели Поинтинга – Томсона, описывающей деформирование стеклянных волокон при высоких температурах. Построить определяющее уравнение такой среды. Модули Юнга упругих пружин обозначить через  $E_0$  и  $E$ , соответственно, а коэффициент вязкости демпфера – через  $\eta$ .

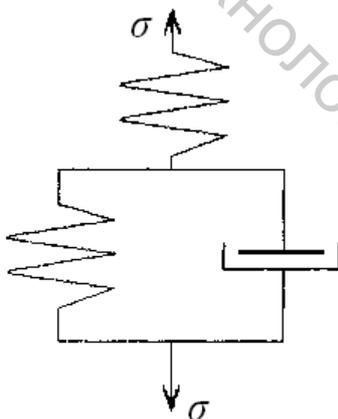


Рисунок 4.1 – Реологическая схема модели Поинтинга – Томсона

##### Методические указания к решению задачи

1. Выразить деформацию пружины по закону Гука.
2. Определить деформацию блока параллельных пружин.
3. Определить модель, которой соответствуют параллельные элементы блока.
4. Записать выражение для определения напряжения  $\sigma$ .
5. Записать определяющее уравнение среды.

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА 5

### ИЗУЧЕНИЕ ДЕФЕКТОВ 3D-ПЕЧАТИ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

**Цель работы:** выполнить анализ дефектов 3D-печати, возникающих при использовании термопластичных материалов, изучить причины их возникновения и способы устранения.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Анализ дефектов 3D-печати, возникающих при использовании термопластичных материалов [5–7].

#### МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

##### 5.1 Анализ дефектов 3D-печати, возникающих при использовании термопластичных материалов

Технологии 3D-печати посредством термопластичных материалов обладают колоссальными возможностями и позволяют практическую любую идею воплотить в реальную трехмерную модель. В теории процесс создания изделия выглядит очень простым: загрузить модель, заправить материалы и нажать кнопку. На практике, особенно когда пользователь только начинает знакомиться с оборудованием, выясняется, что напечатать качественный объект не так уж и легко. В процессе печати возникают различного рода дефекты: края детали заворачиваются, пластик провисает потеками, появляются поры, неоднородность пропечатывания и т. п.

##### Методические указания к выполнению работы

При выполнении данной практической работы необходимо, используя интернет-источники, изучить дефекты, возникающие в процессе 3D-печати деталей термопластичными материалами (на примере FDM-печати). Результаты анализа необходимо представить по форме таблицы 5.1.

Таблица 5.1 – Дефекты, возникающие в процессе 3D-печати деталей термопластичными материалами

Наименование дефекта	Внешний вид	Причины возникновения	Способ устранения
1	2	3	4

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА 6

### СОСТАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ НА ВЫПОЛНЕНИЕ ОПЫТНО-КОНСТРУКТОРСКИХ ИЛИ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РАБОТ

**Цель работы:** освоить принципы составления технического задания на выполнение опытно-конструкторских или научно-исследовательских работ.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Изучение нормативно-технической документации, регламентирующей порядок выполнения научно-исследовательских, опытно-конструкторских и опытно-технологических работ по созданию научно-технической продукции [4].

2. Разработка технического задания на проектирование и изготовление нового изделия посредством FDM-печати.

#### МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

##### **6.1 Изучение нормативно-технической документации, регламентирующей порядок выполнения научно-исследовательских, опытно-конструкторских и опытно-технологических работ по созданию научно-технической продукции**

Порядок выполнения научно-исследовательских, опытно-конструкторских и опытно-технологических работ по созданию научно-технической продукции регламентируется СТБ 1080-2011 «Порядок выполнения научно-исследовательских, опытно-конструкторских и опытно-технологических работ по созданию научно-технической продукции».

В соответствии с указанным документом техническое задание (ТЗ) на выполнение научно-исследовательских (НИР), опытно-конструкторских (ОКР) и опытно-технологических работ (ОТР) является основным исходным документом, определяющим необходимые требования к создаваемой научно-технической продукции (НТП). Разработку ТЗ на выполнение НИР, ОКР и ОТР осуществляют на основании требований заказчика, анализа перспектив развития науки и техники в данной области с учетом прогнозируемых показателей научно-технического уровня и требований рынка.

Если НИР охватывает несколько видов научной деятельности, то, как правило, требуется дополнительно разработка отдельных ТЗ по каждому из этих видов. Если по выполняемой теме НИР, ОКР и ОТР проводятся исследования и изготавливаются экспериментальные (опытные и др.) образцы несколь-

ких изделий и если требования по каждому изделию различны, то необходима разработка отдельных технических заданий (ТЗ) на каждое изделие. (ТЗ) разрабатывают одновременно с оформлением договора на выполнение НИР, ОКР и ОТР, которое должно входить в состав комплекта документов, прилагаемых к договору. В отдельных случаях по взаимной договоренности исполнителя и заказчика разработка ТЗ может планироваться в виде отдельного этапа или входить в состав работ, выполняемых по первому этапу НИР, ОКР и ОТР. При инициативной разработке допускается в качестве ТЗ использовать другой документ (протокол, решение и т. д.), имеющий достаточные исходные данные для выполнения НИР, ОКР и ОТР. Форма титульного листа ТЗ на выполнение НИР, ОКР и ОТР приведена на рисунке 6.1. ТЗ на выполнение ОКР и ОТР подлежит согласованию с изготовителем продукции, если он определен к моменту разработки ТЗ.

## **6.2 Разработка технического задания на проектирование и изготовление нового изделия посредством FDM-печати**

При разработке технического задания на проектирование и изготовление нового изделия посредством FDM-печати необходимо сформулировать и пояснить следующие пункты:

- наименование изделия и область его применения.

Например, «Данное техническое задание распространяется на ...»;

- указать целевое назначение нового изделия;

- сформулировать технические требования, включающие требования к конструкции, технологические требования, требования безопасности по ГОСТ 12.2.003-91, требования к патентной чистоте на территории Республики Беларусь;

- сформулировать требования к условиям эксплуатации, к обслуживанию и ремонту, экономические требования;

- определить серийность изготовления нового изделия.

**Приложение Б**  
(рекомендуемое)

**Форма титульного листа технического задания**

СОГЛАСОВАНО \*

\_\_\_\_\_  
должность\_\_\_\_\_  
подпись      инициалы, фамилия

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

УТВЕРЖДАЮ

\_\_\_\_\_  
должность\_\_\_\_\_  
подпись      инициалы, фамилия

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ**

на разработку \_\_\_\_\_

наименование НИР, ОКР и ОТР

Действует с дополнением \*\* \_\_\_\_\_

номер дополнения

РАЗРАБОТЧИК \*\*\*

\_\_\_\_\_  
должность\_\_\_\_\_  
подпись      инициалы, фамилия

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

\* Заполняют при необходимости согласования ТЗ. В случае большого количества согласующих подписей вводится второй лист. При этом в конце титульного листа указывают «Продолжение на следующем листе», а в верхнем правом углу второго листа – «Продолжение титульного листа».

\*\* Заполняют при выпуске дополнения к ТЗ.

\*\*\* При инициативной разработке не заполняют.

Рисунок 6.1 – Форма технического задания в соответствии с  
СТБ 1080-2011

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА 7

### ХАРАКТЕРИСТИКА И ВЫБОР МАТЕРИАЛА ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ. РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКОГО ПРЕДЛОЖЕНИЯ НА ВЫПОЛНЕНИЕ ОПЫТНО-КОНСТРУКТОРСКОЙ ИЛИ НАУЧНО- ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЫ

**Цель работы:** освоить принципы составления технического предложения на выполнение опытно-конструкторской или научно-исследовательской работы.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Характеристика и выбор материала [5–7].
2. Разработка технического предложения на проектирование и изготовление нового изделия посредством 3D-печати.
  - 2.1. Поиск и оценка конструктивного решения аналогов по источникам научно-технической и патентной информации.
  - 2.2. Разработка эскизных предложений и выбор основного изделия.

#### МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

##### 7.1 Характеристика и выбор материала для FDM-печати

Выбор материала в 3D-печати, как и в любой созидательной деятельности, одна из важнейших вещей. От материала зависят не только механические и химические свойства будущего изделия, но и его эстетическая ценность.

В соответствии с требованиями технического задания, разработанными ранее, необходимо осуществить выбор материала для 3D-печати и дать его краткую характеристику.

Выбор материалов для 3D-печати осуществляется исходя из анализа литературных или интернет-источников. Характеристику основных свойств материалов, пригодных для 3D-печати проектируемого изделия в соответствии разработанными и сформулированными в техническом задании требованиями, необходимо представить в виде таблицы 7.1. Данные также могут быть представлены в описательной форме.

Таблица 7.1 – Характеристика материалов, пригодных для 3D-печати

(наименование изделия)		
Материал	Характеристика	Область применения
1	2	3

Здесь же (табл. 7.2) должна быть представлена характеристика материалов-аналогов, имеющихся в Научно-технологическом парке УО «ВГТУ», и дана краткая сравнительная характеристика с выбранным оптимальным вариантом (из табл. 7.1).

Таблица 7.2 – Сравнительная характеристика материалов для 3D-печати

(наименование изделия)		
Выбранный материал (из таблицы 7.1)	Материал-аналог	Сравнительная характеристика
1	2	3

## **7.2 Разработка технического предложения на проектирование и изготовление нового изделия посредством 3D-печати**

### **7.2.1 Поиск и оценка конструктивного решения аналогов по источникам научно-технической и патентной информации**

При выполнении данного пункта задания необходимо изучить и в описательной форме кратко охарактеризовать конструктивное решение моделей-аналогов по источникам научно-технической и патентной информации. Здесь же могут быть представлены рисунки, иллюстрирующие конструктивное решение изделия, приведены технические параметры моделей-аналогов, проанализированы и изложены в описательной форме их достоинства и недостатки.

### **7.2.2 Разработка эскизных предложений и выбор основного изделия**

При разработке серии эскизных предложений нового изделия посредством 3D-печати следует использовать данные технического задания и перспективные решения, выявленные в результате поиска и критической оценки конструктивного решения аналогов по источникам научно-технической и патентной информации.

Для наглядного представления необходимо выполнить эскизы 3 вариантов новых изделий. В описательной форме привести краткую характеристику предлагаемых конструктивных решений с указанием основных технических параметров и осуществить выбор основного изделия, наиболее полно отвечающего требованиям технического задания.

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА 8

### РАЗРАБОТКА РАБОЧЕЙ ДОКУМЕНТАЦИИ ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ. ПОДГОТОВКА 3D-МОДЕЛИ ДЛЯ ПЕЧАТИ

**Цель работы:** освоить принципы разработки 3D-модели изделия и ее подготовки для печати.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Разработка рабочей документации для 3D-печати [8].
  - 1.1 Характеристика программного продукта для создания 3D-модели.
  - 1.2 Разработка 3D-модели изделия (детали).
  - 1.3 Разработка сборочного чертежа и спецификации деталей.
2. Подготовка 3D-модели к печати [8].

#### МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

##### 8.1 Разработка рабочей документации для 3D-печати

##### 8.1.1 Характеристика программного продукта для создания 3D-модели

###### Информация для ознакомления

Для создания 3D-модели изделия предлагается достаточно много программных продуктов, например, SolidWorks, Autodesk Inventor.

SolidWorks – программный комплекс САПР для автоматизации работ промышленного предприятия на этапах конструкторской и технологической подготовки производства. Обеспечивает разработку изделий любой степени сложности и назначения.

Autodesk Inventor – система трёхмерного твердотельного и поверхностного параметрического проектирования (САПР) компании Autodesk, предназначенная для создания цифровых прототипов промышленных изделий. Инструменты Inventor обеспечивают полный цикл проектирования и создания конструкторской документации.

###### Выполнение работы

При выполнении данного этапа работы необходимо дать краткую характеристику программного продукта, выбранного для создания 3D-модели, отметить достоинства и недостатки.

## 8.1.2 Разработка 3D-модели изделия (детали)

### Выполнение работы

При выполнении данного подраздела работы необходимо в описательной форме охарактеризовать основные этапы создания 3D-модели (деталей, входящих в состав сборочной единицы). Каждый этап работы должен сопровождаться рисунками.

Например,\*

1. Размеры на эскизе проставлены с помощью команды «Автоматическое нанесение размеров». С помощью элемента «Вытянутая бобышка/основание» эскиз вытянут на указанное расстояние (рис. 8.1).

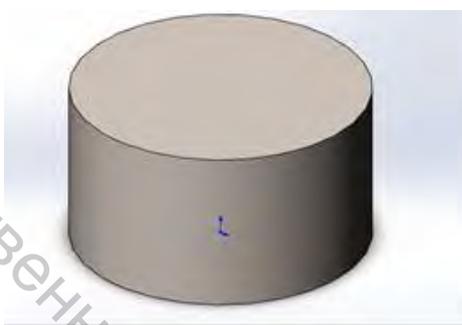


Рисунок 8.1 – Использование инструментов «Автоматическое нанесение размеров» и «Вытянутая бобышка/основание» при создании 3D-модели изделия (детали, входящей в состав сборочной единицы)

2. С помощью элемента «Вытянутый вырез» выполнен сквозной вырез, с помощью вставки «Условное обозначение резьбы» нарезана резьба на заданном расстоянии (рис. 8.2).



Рисунок 8.2 – Использование инструментов «Вытянутый вырез» и «Условное обозначение резьбы» при создании 3D-модели изделия (детали, входящей в состав сборочной единицы)

**Если разрабатываемое изделие не содержит сборочных единиц, то данный подраздел может отсутствовать.**

\* использованы материалы сайта <https://helpiks.org/2-3949.html>.

### 8.1.3 Разработка сборочного чертежа и спецификации деталей

#### Выполнение работы

Данный подраздел работы выполняется аналогично предыдущему подразделу. В описательной форме характеризуются основные этапы по созданию сборочного чертежа или 3D-модели изделия.

### 8.2 Подготовка 3D-модели к печати

#### Информация для ознакомления

FDM – самая доступная и распространенная технология 3D-печати в мире. По этой технологии работают как дешевые домашние и персональные 3D-принтеры, так и промышленные высокоточные машины. Основным преимуществом данной технологии является низкая стоимость расходных материалов. Кроме того, сам расходный материал подходит для послепечатной обработки изделий. Изделия, полученные методом FDM-печати, обычно одноцветные, прочные и упругие, обладают стабильным набором физических характеристик, которые зависят от типа материала. Они могут быть термостойкими, износостойчивыми, обладать повышенной гибкостью или ударной вязкостью и т. д.

Технология FDM-печати подразумевает создание трехмерных объектов за счет нанесения последовательных слоев материала, повторяющих контуры цифровой модели. Точность построения моделей по технологии FDM-печати во многом зависит от толщины печатного слоя и точности позиционирования экструдера относительно платформы. Эта величина может составлять от 0,02 до 1,2 мм. Поверхность готовых объектов ребристая (ступенчатая – в пределах 0,02–1,2 мм). Ребристость обусловлена тем, что расплавленная нить имеет округлую форму. Придать дополнительную гладкость поверхности можно с помощью постобработки.

Производственный цикл начинается с обработки трехмерной цифровой модели. Модель в формате .stl делится на слои и ориентируется наиболее подходящим образом для печати. При необходимости генерируются поддерживающие структуры, необходимые для печати нависающих элементов. В специальном ПО готовится управляющая программа для 3D-принтера.

#### Выполнение работы

На данном этапе выполнения работы необходимо **привести краткую характеристику, способы и особенности** (например, влияние высоты хорды и углового допуска) перевода 3D-модели в формат .stl и пошаговое описание данного процесса.

Например, пошагово перевод 3D-модели из программы Solidworks в формат .stl предполагает выполнение следующих действий:

1. Открытие вкладки File > Save As...
2. Установление тип файла STL(\*.stl).
3. Открытие вкладки Options.
4. Установление исходящего формата файла (например, Binary).
5. Выбор единиц измерения (миллиметры или дюймы (Unit: > Millimeters or Inches).
6. Выбор разрешения (например, хорошее (Resolution > Fine).
7. Нажмите ОК.
8. Введите имя файла.
9. Сохраните.

### **Информация для ознакомления**

При FDM-печати модель производится выдавливанием («экструзией») и нанесением расплавленного термопластика с формированием последовательных слоев, застывающих сразу после экструдирования. Пластиковая нить (филамент) разматывается с катушки и вводится в экструдер – устройство, оснащенное механическим приводом для подачи нити, нагревательным элементом для плавки филамента и соплом, через которое осуществляется непосредственно экструзия. Нагревательный элемент служит для нагревания сопла, которое в свою очередь плавит филамент и подает расплавленный материал на поверхность рабочего стола (для первого слоя) или на предыдущий слой, соединяясь с ним.

Экструдер (также называемый «печатной головкой») перемещается в горизонтальной плоскости и постепенно наносит нужный слой, после чего происходит вертикальное перемещение (чаще всего опусканием стола, но есть модели, в которых приподнимается экструдер) на толщину слоя и процесс повторяется до тех пор, пока модель не будет построена полностью.

FDM-принтеры в качестве материалов для печати используют термопластики в виде тонких нитей, намотанных на катушки. Ассортимент пластиков весьма широк. Одними из самых популярных пластиков для печати являются PLA-пластик, ABS-пластик.

Кроме PLA и ABS возможна печать нейлоном, поликарбонатом, полиэтиленом и многими другими термопластиками, широко распространенными в современной промышленности. Возможно применение такого материала, как поливиниловый спирт (PVA-пластик). Этот материал растворяется в воде, что делает возможным печать моделей сложной геометрической формы.

### **Выполнение работы**

Далее необходимо в описательной форме **привести достоинства и недостатки** FDM-технологии.

Например, к достоинствам FDM-технологии можно отнести:

- в процессе моделирования создаются качественные детали с высокой детализацией сложных геометрических форм и полостей;
- достаточная дешевизна расходных материалов и т. п.

К недостаткам данной технологии можно отнести:

– невысокую скорость работы (высокой скоростью работы не могут похвастать и другие технологии. Для построения крупных и сложных моделей требуется много времени) и т. п.

Особое внимание следует уделить описанию таких недостатков, как зависимость прочности изделий, изготовленных по FDM-технологии, от направления, в котором прикладывается усилие, и термоусадки.

### **Информация для ознакомления**

Для FDM-печати чаще используются пластиковые нити двух стандартных диаметров: 1,75 и 3 мм. Естественно, они не взаимозаменяемы, и выбор нужного диаметра следует уточнять по спецификации принтера. Поставляется пластик на катушках и измеряется не длиной, а весом.

Для каждого типа материала должны быть известны рабочая температура, до которой должен нагреваться материал в печатающей головке, и температура подогрева рабочего стола (платформы) для лучшего прилипания первого слоя.

Аналогично любому методу обработки в альтернативных видах производства в 3D-печати существуют основные режимы. От того, насколько правильно будут подобраны режимы, зависит качество получаемых изделий. Каждая модель 3D-принтера обладает своими особенностями, благодаря чему нельзя однозначно сказать, какой режим подойдет для печати необходимого изделия. Кроме того, зачастую расходные материалы разных производителей обладают различными свойствами, даже цвет, в который окрашен полимер, влияет на конечный результат.

Рассмотрим основные режимы 3D-печати: температура, скорость, толщина слоя, программные настройки принтера.

В работе 3D-принтера возникает необходимость в настройке разных температур. Один из показателей – температура первого слоя. Первый слой является одним из самых ответственных моментов в 3D-печати изделия, так как от того, насколько качественно, ровно и с соблюдением необходимой геометрии ляжет пластик на стол 3D-принтера, во многом зависит дальнейшая печать детали. Как правило, температура первого слоя не отличается существенно от температуры экструзии и колеблется в пределах, больших на  $0\div 10$  °С выше последнего. Температура экструзии подбирается в соответствии с используемым материалом. Рекомендуемая температура печати указывается на упаковке полимера. Важно соблюдать данные производителем характеристики во избежание дефектов 3D-печати, вызванных неправильно выбранной температурой. К числу таких дефектов можно отнести недостаточную экструзию или перегрев пластика. Оптимальная температура экструзии зависит от типа используемого полимера. Для числа наиболее распространенных материалов и FDM-принтеров рекомендуемые диапазоны температуры экструдера варьируются в пределах 200–245 °С. Третий температурный параметр, влияющий на качество 3D-печати, – температура стола 3D-принтера. Температура, до которой нагревается стол 3D-принтера, обычно варьируются в пределах 50–110 °С.

Толщина слоя или высота слоя – параметр, выбираемый заранее в программном обеспечении для подготовки моделей к 3D-печати. С тактильной точки зрения от высоты слоя зависит то, насколько деталь будет гладкой на ощупь. Но толщина слоя способна влиять на множество свойств распечатанного изделия, в числе которых прочность полимерного материала. Явление изменения прочности возникает вследствие изменения межслоевой адгезии при выборе высоты слоя. Как правило, толщина слоя современных FDM-принтеров варьируется в диапазоне 0,02–1,2 мм. На рисунке 8.3 представлен внешний вид бокового отверстия при разной толщине слоя.

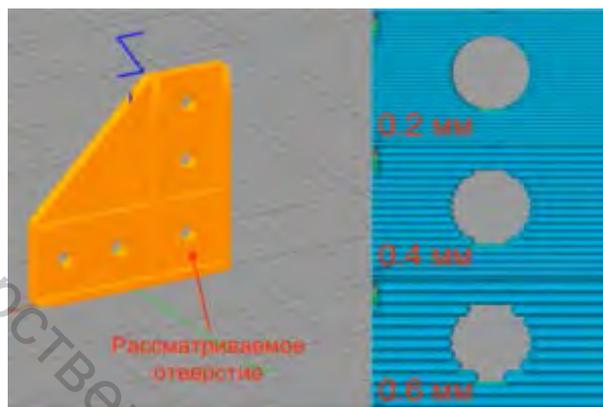


Рисунок 8.3 – Точность бокового отверстия от выбранной высоты слоя

Диаметр сопла – диаметр наименьшего отверстия в сопле 3D-принтера, через которое экструдируется расходный материал. От выбора этого параметра зависит, насколько точно 3D-принтер будет заходить в углы модели и насколько качественно будет прорисован рельеф детали. Однако стоит понимать, что если сопло будет совсем тонким, то вырастает риск его засорения и увеличится время 3D-печати. В дополнение к этому стоит отметить, что чем больше диаметр сопла, тем выше диапазон выбора другого немаловажного параметра – «высота слоя». Поэтому выбор данного параметра очень важен, требует постоянного подбора, мониторинга и корректировки.

Температура сопла – температура, до которой нагревается сопло для того, чтобы иметь возможность экструдировать термопласт при других выбранных режимах (скорость печати, скорость подачи, скорость ретракта, величина ретракта).

Коэффициент подачи – коэффициент, корректирующий подачу расходного материала для максимального заполнения ширины фактической экструзии. В процессе 3D-печати по технологии FDM присутствует закономерность сохранения объемов. Пластик не сгорает, не испаряется, а в том же количестве, что попал в сопло, экструдируется. Однако в некоторых случаях машина начинает «недодавливаться» или «передавливаться». Такие случаи называются «недоэкструзия» или «переэкструзия». Причин этому может быть очень много: частичное засорение сопла, неправильная калибровка шаговых двигателей и т. п. Для пра-

вильной работы 3D-принтера данный параметр должен быть откалиброван. В процессе печати можно корректировать данный параметр для достижения каких-либо специфичных требований.

Обдув – параметр, характеризующий интенсивность работы вентилятора, направленного в зону экструзии. Во время 3D-печати выдавленный пластик должен затвердеть, чем быстрее, тем лучше, потому что слой не успеет никуда «уплыть». Однако для некоторых материалов большой обдув опасен, потому что чрезмерно будет охлаждать материал и может произойти деламинация слоев или отлипание детали от платформы. Параметр устанавливается в зависимости от расходного материала.

Температура стола – температура, до которой нагревается платформа 3D-принтера во время 3D-печати.

Ретракт – откат пластика при перемещении экструдера без подачи материала, например, на новый периметр. Если выключить эту функцию, то при перемещении материал начнет вытекать и потянет за собой нитку, что приведет к снижению качества. За ретракт отвечают два параметра: скорость отката и величина отката. При неправильной настройке данных параметров пластик может перерубаться или выливаться из сопла. Настраивается в зависимости от материала и ускорения перемещения экструдера.

Заполнение – плотность внутреннего пространства детали при трехмерной печати, выражающаяся в отношении заполненного пространства ко всему внутреннему объему детали.

Скорость печати – скорость перемещения экструдера в процессе выдавливания пластика. Излишне высокая скорость 3D-печати делает поверхность непригодной для использования (40 мм/с и 50 мм/с), тогда как слишком низкая скорость печати не обеспечивает необходимую производительность. При низких скоростях печати качество приемлемое, но это может негативно повлиять на межслоевую адгезию (нижние слои будут остывать, пока экструдер дойдет до прохождения контура повторно).

Скорость перемещения – скорость перемещения экструдера в момент, когда отключена подача материала, например, при перекачивании на новый периметр. Задается дополнительно с ускорением перемещения. Чем резче будет начало перемещения, чем лучше этот факт скажется на обрыве нитки вытекающего термопласта. Однако совсем резкий старт может привести к смещению ремня, который обеспечивает движение экструдера. Этот параметр очень сильно может ускорить процесс 3D-печати, но нужно точно понимать возможности и состояние машины, чтобы работать с данным параметром на максимуме.

Опускание стола при перемещении необходимо для того, чтобы экструдер при перемещении не задевал напечатанную часть объекта.

Траектория – программируется в специальном ПО, где задаются все вышеперечисленные и дополнительные параметры печати.

### Выполнение работы

На основании изложенной информации для разрабатываемой конкретной модели изделия необходимо заполнить таблицу 8.1, определяющую основные характеристики FDM-печати.

Таблица 8.1 – Основные характеристики FDM-печати \_\_\_\_\_

наименование изделия, марка основного материала и материала поддержки	
Наименование параметра	Значение параметра
Диаметр используемой пластиковой нити	
Рабочая температура нагрева материала в печатающей головке	
Температура подогрева рабочего стола	
Температура первого слоя	
Высота слоя	
Диаметр сопла экструдера	
Температура сопла	
Коэффициент подачи	
Обдув	
Скорость отката	
Величина отката	
Процент заполнения	
Скорость печати	
Скорость перемещения	
Опускание стола	
Траектория	

\* использован материал сайта <https://studia3d.com/>.

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА 9

### ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СВОЙСТВ ИЗДЕЛИЙ ИЛИ МАТЕРИАЛОВ АДДИТИВНОГО СИНТЕЗА

**Цель работы:** освоить методику прогнозирования свойств изделий или материалов аддитивного синтеза по свойствам исходных компонентов.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Прогнозирование свойств изделий или материалов аддитивного синтеза по свойствам компонентов.
2. Составление программы и методики экспериментального исследования. Сравнение прогнозных значений с результатами эксперимента [9–12].

#### МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

##### 9.1 Прогнозирование свойств изделий или материалов аддитивного синтеза по свойствам компонентов

###### Выполнение работы

На первом этапе с учетом данных технического задания и установленных условий эксплуатации для разработанных изделий необходимо определить основные виды воздействий, которым будет подвержено изделие с указанием диапазона значений.

Для разработанной виртуальной модели необходимо определить участки (области) изделия, подвергаемые наибольшей нагрузке. Для этих областей в программе SolidWorks, Autodesk Inventor и т. п. необходимо выполнить анализ напряжений. Пример отчета по анализу напряжений, выполненный в программе Autodesk Inventor, приведен на рисунках 9.1–9.4.

## Отчет 1 по анализу напряжений



Анализируемый файл:	
Версия Autodesk Inventor:	2018 (Build 220112000, 112)
Дата создания:	27.05.2019, 15:50
Автор исследования:	
Сводка:	

### Сведения о проекте (свойства Inventor)

#### Сводка

Разраб: Каноненкина Наталья

#### Статус

Стадия проекта: Разработка

#### Физические параметры

Масса	5,26684 кг
Площадь	335381 мм <sup>2</sup>
Объем	5266840 мм <sup>3</sup>
Центр масс	x=372,407 мм y=-512,005 мм z=-506,124 мм

Примечание: физические значения могут отличаться от физических значений, используемых в АМКЭ, описанных ниже.

### Статический анализ: 1

#### Общая цель и параметры:

Цель проецирования:	Однолучный
Тип исследования:	Статический анализ
Дата последнего изменения:	27.05.2019, 15:50
Обнаружить и устранить моды жесткого тела:	Да
Разделить поперечные напряжения контактных поверхностей:	Да
Анализ нагрузок движения:	Нет

Рисунок 9.1 – Скриншот экрана отчета по анализу напряжений

#### Настройки сетки:

Средний размер элемента (дробное значение от диаметра модели)	0,03
Минимальный размер элемента (дробное значение от среднего размера)	0,2
Коэффициент неравномерности	1,5
Макс. угол поворота	60 град
Создать изолированные элементы сетки	Нет
Использовать для сетки сборки кончрения на основе дерева	Да

#### Материал(-ы)

Имя	Пластик АБС	
Общие	Массовая плотность	1,06 г/см <sup>3</sup>
	Предел текучести	20 МПа
	Окончательный предел прочности растяжения	29,6 МПа
Напряжения:	Модуль Юнга	2,24 ГПа
	Коэффициент Пуассона	0,38 Бр.
Наименование деталей	1_str.prt	

#### Рабочие условия

##### Сила: 1

Тип нагрузки:	Сила
Величина	420,000 Н
Вектор X	-40,716 Н
Вектор Y	-415,840 Н
Вектор Z	-42,558 Н

#### Выбранные грани



Рисунок 9.2 – Скриншот экрана отчета по анализу напряжений

Рисунки

Напряжение по Минусу

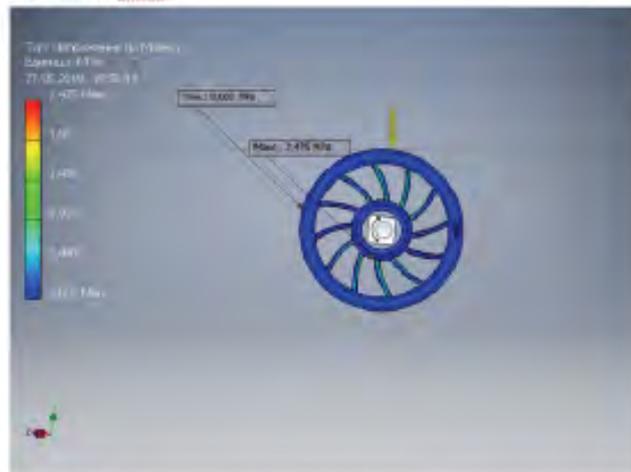


Рисунок 9.3 – Скриншот экрана отчета по анализу напряжений

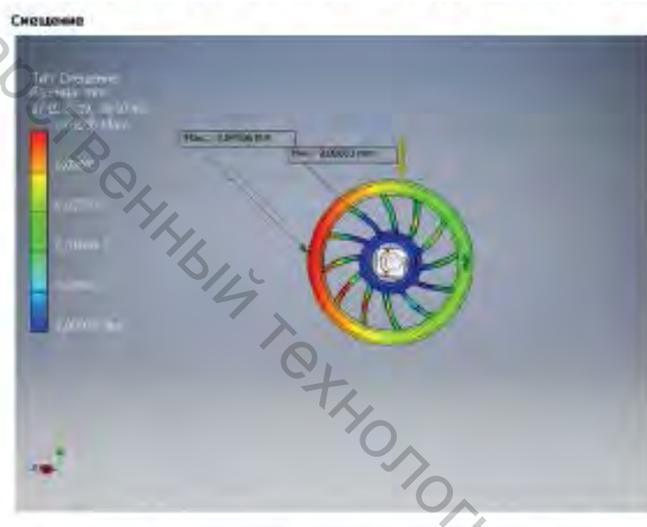


Рисунок 9.4 – Скриншот экрана отчета по анализу напряжений

\* использован материал сайта <https://studia3d.com>

Для виртуальной модели изделия необходимо **обязательно выполнить анализ напряжений, возникающих при растяжении** самого слабого участка.

## 9.2 Составление программы и методики экспериментального исследования. Сравнение прогнозных значений с результатами эксперимента

### **Информация для ознакомления**

Составление программы проведения экспериментальных исследований выполняется с учетом оборудования, имеющегося на кафедре «ТиОМП». Одним из методов определения прочности изделий, полученных методом FDM-

печати, является испытание на растяжение, которое выполняется согласно ГОСТ 11262-2017 «Пластмассы. Методы испытания на растяжение». Настоящий стандарт распространяется на пластмассы и устанавливает метод и условия определения свойств пластмасс при растяжении с учетом общих принципов, установленных в ГОСТ 34370.

Стандарт распространяется на следующие материалы:

– жесткие и полужесткие термопластичные материалы для литья, экструзии и прессования, включая композиции, наполненные и армированные рубленными волокнами, матами, или гранулами, за исключением текстильных волокон (см. ГОСТ 32656)];

– жесткие и полужесткие терморезистивные формовочные материалы, включая наполненные и армированные композиции, кроме композиций, армированных текстильными волокнами (см. ГОСТ 32656)];

– термотропные жидкокристаллические полимеры.

Стандарт не распространяется на жесткие и эластичные ячеистые пластмассы, для которых используют методы, установленные ГОСТ 17370 и ГОСТ 15873 соответственно, а также многослойные структуры, содержащие ячеистый материал.

### **Выполнение работы**

При составлении программы и методики проведения экспериментальных исследований необходимо изучить ГОСТ 11262-2017 «Пластмассы. Методы испытания на растяжение» или иные приведенные стандарты (например, ГОСТ 17370 или ГОСТ 15873) и в описательной форме указать оборудование и кратко изложить методику проведения испытаний на растяжение элемента (самого слабого участка) изделия.

Заключительным этапом работы является сравнительный анализ результатов экспериментальных данных и прогнозных значений напряжения. Для проведения анализа и формулировки выводов по работе необходимо в табличной форме привести значения, полученные в ходе нагружения самых слабых участков изделия и значения, полученные в результате проведения экспериментальных исследований, а также определить относительную погрешность результатов теоретических исследований.

Результаты работы необходимо представить в форме таблицы 9.1.

Таблица 9.1

Величина приложенной нагрузки, Н	Исходная длина образца, $l_1$ , мм		Длина образца после приложения нагрузки, $l_2$ , мм		$\Delta l = l_1 - l_2$ , мм		Относительная погрешность результатов статического анализа напряжений, %
	3D-модели	распечатанной детали (изделия)	3D-модели	распечатанной детали (изделия)	3D-модели	распечатанной детали (изделия)	

Относительную погрешность результатов статистического анализа напряжений необходимо рассчитать по формуле:

$$\delta = \frac{|\Delta l_1 - \Delta l_2|}{\Delta l_2} \cdot 100,$$

где  $\Delta l_1$  – абсолютное удлинение при нагружении 3D-модели, мм;  $\Delta l_2$  – абсолютное удлинение при нагружении распечатанной детали (изделия), мм.

Витебский государственный технологический университет

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ставров, В. П. Механика композиционных материалов : учеб. пособие / В. П. Ставров. – Минск : БГТУ, 2008. – 259 с.
2. Ставров, В. П. Механика композиционных материалов. Практикум : учеб. пособие / В. П. Ставров, А. Л. Наркевич. – Минск : БГТУ, 2012. – 218 с.
3. Скворцов, Ю. В. Механика композиционных материалов / Ю. В. Скворцов. – Самара : ФГБОУ «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королева [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://docplayer.ru/53943272-Mehanika-kompozicionnyh-materialov.html>. – Дата доступа: 30.08.2019.
4. ГОСТ 2.103-2013. Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Стадии разработки (с Поправками). – Введ. 2015-01-07. – Москва : Стандартинформ, 2019. – 13 с.
5. Антонова, В. С. Аддитивные технологии: учебное пособие / В. С. Антонова, И. И. Осовская. – СПб. : ВШТЭ СПбГУПТД, 2017. – 30 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nizf.narod.ru/metod/kaffizikollchem/25.pdf>. – Дата доступа: 31.05.2018.
6. Зеленко, М. А. Аддитивные технологии в машиностроении: пособие для инженеров / М. А. Зеленко, М. В. Нагайцев, В. М. Довбыш. – Москва : ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. – 220 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.vneshtekhnika.ru/rus/books/123pd.pdf>. – Дата доступа: 31.05.2018.
5. Сухочев, Г. А. Технология машиностроения. Аддитивные технологии в подготовке производства наукоемких изделий / Г. А. Сухочев, С. Н. Коденцев, Е. Г. Смольяникова. – Воронеж : Воронежский гос. технический ун-т, 2013. – 222 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://cchgeu.ru/upload/iblock/180/uchebposob\\_tm.pdf](http://cchgeu.ru/upload/iblock/180/uchebposob_tm.pdf). – Дата доступа: 31.05.2018.
8. Филатов, С. А. Аддитивные технологии: современное состояние и перспективы / С. А. Филатов // Белорусский государственный университет [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://research.bsu.by/additive-manufacturing-seminar/>. – Дата доступа : 31.05.2018.
9. ГОСТ 11262-2017 (ISO 527-2:2012). Пластмассы. Методы испытания на растяжение. – Введ. 2018-10-01. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 44 с.
10. ГОСТ 32656-2017 (ISO 527-4 : 1997, ISO 527-5 : 2009). Композиты полимерные. Методы испытаний. Испытания на растяжение. – Введ. 2018-07-01. – Москва : Стандартинформ, 2017. – 24 с.
11. ГОСТ 17370-2017. Пластмассы ячеистые жесткие. Метод испытания на растяжение. – Введ. 2018-06-01. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 11 с.
12. ГОСТ 15873-2017. Пластмассы ячеистые эластичные. Метод испытания на растяжение. – Введ. 2018-07-01. – Москва : Стандартинформ, 2017. – 12 с.

Учебное издание

## МЕХАНИКА МАТЕРИАЛОВ АДДИТИВНОГО СИНТЕЗА

Методические указания  
по выполнению практических работ

Составитель:  
Довыденкова Вера Петровна

Редактор *Т.А. Осипова*  
Корректор *Т.А. Осипова*  
Компьютерная верстка *Н.В. Карпова*

---

Подписано к печати 12.10.2020. Формат  $60 \times 90 \frac{1}{16}$ . Усл. печ. листов 2,2.  
Уч.-изд. листов 2,8. Тираж 35 экз. Заказ № 293.

Учреждение образования «Витебский государственный технологический университет»  
210038, г. Витебск, Московский пр-т, 72.

Отпечатано на ризографе учреждения образования

«Витебский государственный технологический университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий № 1/172 от 12 февраля.2014 г.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий № 3/1497 от 30 мая 2017 г.