

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Технологии металлов»

МЕХАНИКА МАТЕРИАЛОВ АДДИТИВНОГО СИНТЕЗА

*Методические рекомендации к лабораторным работам
для студентов специальности
6-05-0722-05 «Производство изделий на основе
трехмерных технологий» дневной формы обучения*



Могилев 2025

УДК 539.3
ББК 30.1
М54

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Технологии металлов» «22» мая 2025 г., протокол № 16

Составитель канд. техн. наук, доц. И. М. Кузменко

Рецензент канд. техн. наук, доц. А. С. Федосенко

Приводятся краткие теоретические сведения, описываются методики выполнения и обработки результатов экспериментов при проведении лабораторных работ студентами специальности 6-05-0722-05 «Производство изделий на основе трехмерных технологий» дневной формы обучения.

Учебное издание

МЕХАНИКА МАТЕРИАЛОВ АДДИТИВНОГО СИНТЕЗА

Ответственный за выпуск	Д. И. Якубович
Корректор	И. В. Голубцова
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

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

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, 2025

Содержание

Введение.....	4
1 Лабораторная работа № 1. Определение механических характеристик материалов аддитивного синтеза при испытании на растяжение.....	5
2 Лабораторная работа № 2. Определение механических характеристик материалов аддитивного синтеза при испытании на сжатие.....	12
3 Лабораторная работа № 3. Определение механических характеристик материалов аддитивного синтеза при испытании на статический изгиб.....	18
4 Лабораторная работа № 4. Определение модуля упругости первого рода материалов аддитивного синтеза.....	23
5 Лабораторная работа № 5. Опытное определение характеристик ползучести материалов аддитивного синтеза.....	29
6 Лабораторная работа № 6. Опытное определение характеристик релаксации напряжений материалов аддитивного синтеза.....	32
7 Лабораторная работа № 7. Опытное исследование концентрации напряжений при растяжении пластины с отверстием.....	35
8 Лабораторная работа № 8. Определение вязкости разрушения материалов аддитивного синтеза при ударном нагружении.....	39
Список литературы.....	44

Введение

Во многих отраслях техники традиционные материалы – металлы, керамику, стекло, древесину – заменяют полимерными и композитными материалами. Выбор материала для конкретной области применения обуславливается его эксплуатационными показателями, которые определяются по результатам лабораторных испытаний.

При производстве изделий на основе трехмерных технологий из полимерных материалов применяются технологии аддитивного синтеза материалов. Свойства таких материалов отличаются от свойств исходных материалов.

В связи с этими обстоятельствами при проектировании изделия, его расчете и технологии изготовления необходимо знать соответствующие характеристики свойств материала изделия и его компонентов [1–8]. Эти свойства определяются на основе стандартных испытаний (растяжение, сжатие, сдвиг, изгиб), а также специальных испытаний.

Результаты испытаний позволяют дать оценку возможности использования материалов аддитивного синтеза в конкретных условиях эксплуатации.

Содержание лабораторных работ соответствует учебной программе, методике выполнения и форме отчета.

Формы отчетов по каждой лабораторной работе приводятся в методических указаниях к ним. Они включают цель работы, исходные данные, протокол испытаний, данные опыта, обработку результатов опыта, выводы.

Порядок выполнения студентом лабораторных работ.

1 Самостоятельно изучить тему работы, используя материалы лекций и литературу, приведенную в данных методических рекомендациях. Ознакомиться с методикой выполнения лабораторной работы.

2 При выполнении лабораторной работы руководствоваться данными методическими рекомендациями, заполняя соответствующие пункты формы отчета.

3 Получить у преподавателя образец для испытаний, произвести его измерения и подготовить к испытанию в соответствии с методикой выполнения работы и формой отчета. Занести данные в форму отчета.

4 Выполнить эксперимент, обработку данных эксперимента и расчеты в соответствии с формой отчета. Представить оформленный отчет преподавателю для проверки и подписи.

5 Изучить контрольные вопросы и ответить на них. Защитить лабораторную работу (устный опрос или тестирование).

6 Студент обязан выполнить и защитить лабораторную работу в течение учебного занятия. Студент, не защитивший две лабораторные работы, к выполнению следующей работы не допускается.

1 Лабораторная работа № 1. Определение механических характеристик материалов аддитивного синтеза при испытании на растяжение

Цель работы

1 Изучить требования ГОСТ 11262–80 *Пластмассы. Метод испытания на растяжение*, ГОСТ Р 56800–2015 *Композиты полимерные. Определение механических свойств при растяжении неармированных и армированных материалов*, ГОСТ 32656 *Композиты полимерные. Методы испытаний. Испытания на растяжение*.

2 На основе испытания на растяжение изучить поведение материалов аддитивного синтеза и определить их основные механические характеристики.

1.1 Порядок работы на испытательной машине

Механические характеристики материалов – это числовые величины, характеризующие прочностные, пластические и другие свойства материалов. Характеристики прочности пластичных материалов, как правило, определяют при испытании их на растяжение, а хрупких материалов – на сжатие.

1.1.1 Краткое описание конструкции машины. Испытания образцов на растяжение из исследуемого материала осуществляют на специальных разрывных или универсальных машинах. В данной работе испытания полимерных материалов выполняются на машине Kason WDW-1. Машина состоит из основного блока, компьютерной системы управления и принтера.

Основной блок состоит из одной направляющей стойки, на которой расположены две зоны для проведения испытаний: верхняя зона предназначена для тестов на растяжение, нижняя – для тестов на сжатие.

Электронная составляющая машины включает в себя систему измерения нагрузки (силы) и систему измерения смещения. Все параметры управления и результаты тестирования отображаются в реальном времени на экране компьютера.

1.1.2 Проведение испытания. Запуск машины и проведение испытания осуществляет инженер лаборатории, который должен: включить главный выключатель на панели питания; включить компьютер и монитор; войти в операционную систему Windows; войти в интерфейс прикладного программного обеспечения, дважды щелкнув значок программного обеспечения MaxTest на главном интерфейсе компьютера. Запуск компьютера завершен; установить образец сначала в нижнем, а затем в верхнем захвате (подготовку образцов к испытаниям и проведение испытаний осуществляет инженер лаборатории); после завершения испытания части образца извлекаются из захватов, отчет с результатами испытания распечатывается и передается студентам для обработки.

1.1.3 Типоразмеры образцов для испытаний на растяжение. В соответствии с ГОСТ 11262–80 *Пластмассы. Метод испытания на растяжение* применяют образцы типов 1–3 (рисунок 1.1).

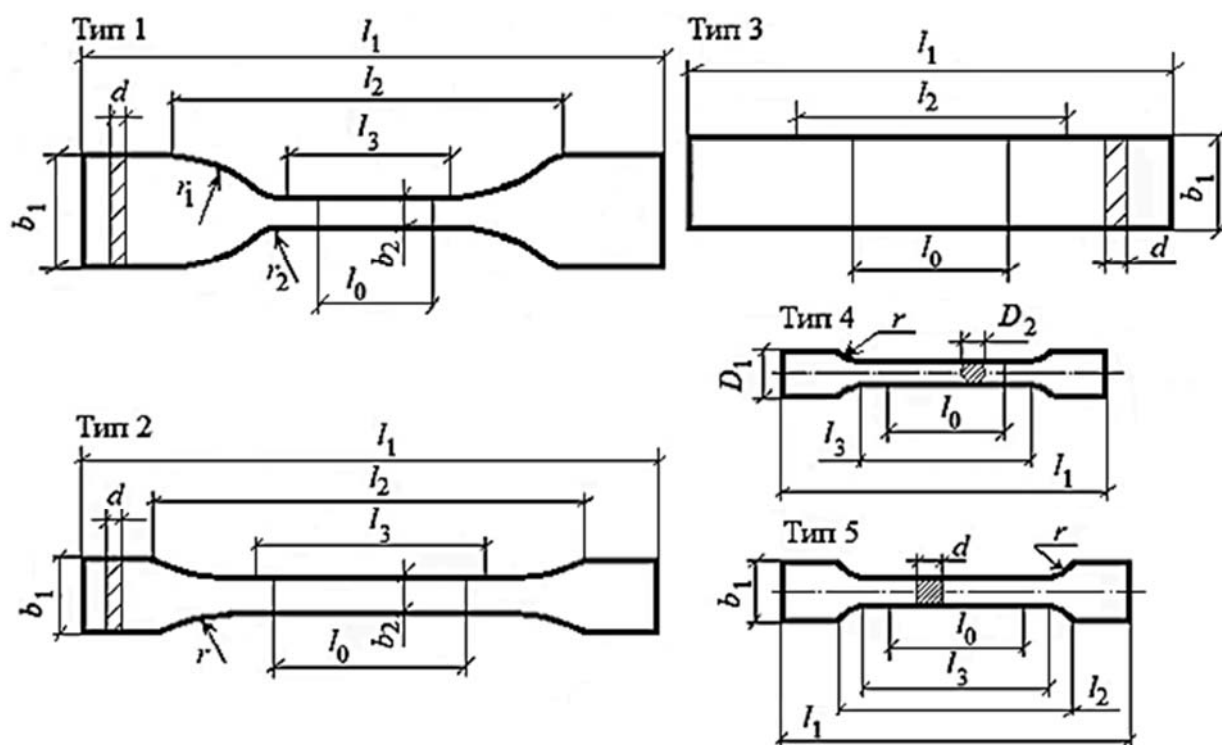


Рисунок 1.1 — Типоразмеры образцов на растяжение

В случае отработки рецептуры материала, режимов переработки и в научно-исследовательских работах рекомендуется применять образцы типов 4 и 5 уменьшенных размеров.

Допускается также применение образцов типов 2 и 3 толщиной менее 1 мм при изготовлении их из листовых материалов, а образцов типа 2 толщиной 3 мм при изготовлении их из наполненных полимерных материалов. Размеры образцов 1–5 типов приведены в таблице 1.1.

1.1.4 Порядок подготовки образцов к испытаниям. Требования к подготовке образцов к испытаниям изложены в ГОСТ 11262–80, пп. 1.2–1.9.

1.1.5 Требования к оборудованию и аппаратуре. Испытательное оборудование и измерительная аппаратура должны соответствовать ГОСТ 11262–80, разд. 2 «Аппаратура».

1.2 Теоретические сведения

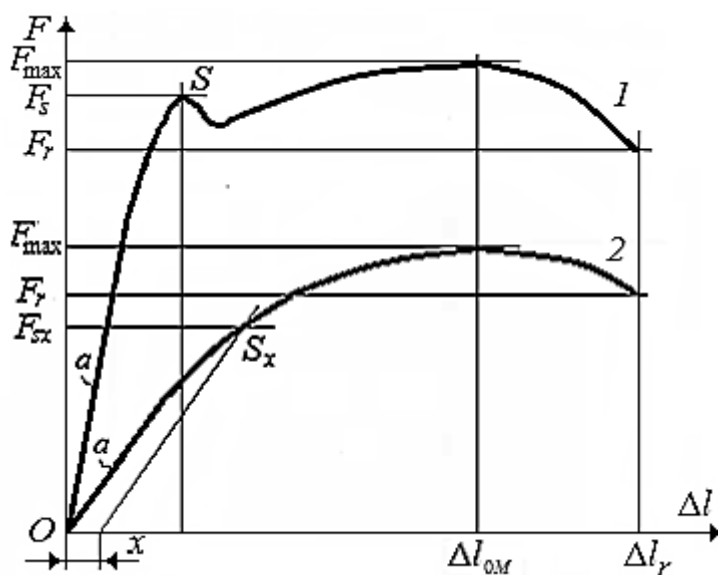
1.2.1 Машинная диаграмма растяжения. Образец, закрепленный в захватах машины, деформируется (удлиняется) под действием растягивающей силы. Напряжение считается статическим, если скорость перемещения захватов постоянна и не превышает 20 мм/мин.

Таблица 1.1 – Размеры образцов типов 1–5

В миллиметрах

Параметр	Тип образца				
	1	2	3	4	5
Общая длина l_1 не менее	115	150	250	80	80
Расстояние между метками, определяющими положение кромок зажимов на образце, l_2	80 ± 5	115 ± 5	170 ± 5	–	52 ± 2
Длина рабочей части l_3	33 ± 1	$60 \pm 0,5$	–	$40 \pm 0,5$	$40 \pm 0,5$
Расчетная длина l_0	25 ± 1	$50 \pm 0,5$	50 ± 1	$25 \pm 0,5$	$25 \pm 0,5$
Ширина головки b_1	25 ± 1	$20 \pm 0,5$	$25 \pm 0,5$	–	$11 \pm 0,2$
Ширина рабочей части b_2	$6 \pm 0,4$	$10 \pm 0,5$	–	–	$5 \pm 0,2$
Толщина d	$2 \pm 0,2$ от 1 до 3	$4 \pm 0,4$ от 1 до 10	$2 \pm 0,2$ от 1 до 6	–	1...4
Радиус закругления r не менее	–	60	–	$6 \pm 0,2$	$6 \pm 0,2$
Радиус закругления большой r_1	25 ± 1	–	–	–	–
Радиус закругления малый r_2	$14 \pm 0,5$	–	–	–	–
Диаметр головки D_1	–	–	–	$11 \pm 0,2$	–
Диаметр рабочей части D_2	–	–	–	$5 \pm 0,2$	–

В результате испытаний получают машинную диаграмму растяжения образца (ГОСТ 11262–80), которая представляет собой график зависимости между силой F , действующей на образец, и его удлинением Δl (рисунок 1.2).

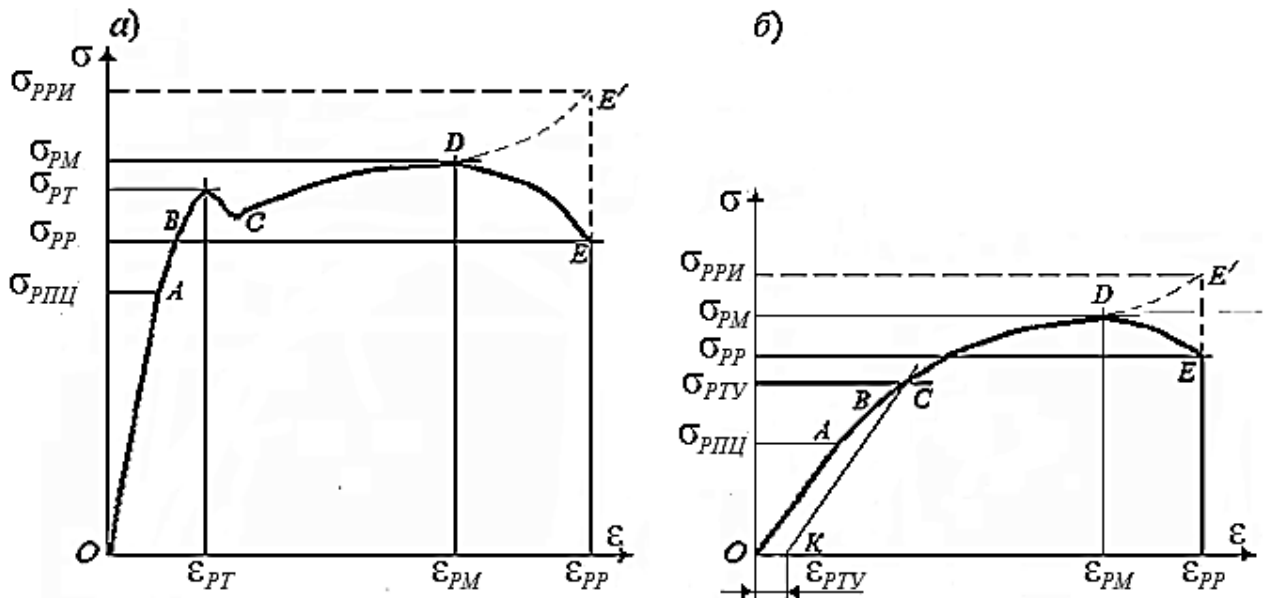


1 – материал имеет предел текучести; 2 – материал не имеет предела текучести; a – прямолинейные участки диаграммы в начале кривой «нагрузка – удлинение»; S – точка соответствует пределу текучести; S_x – соответствует условному пределу текучести; Δl_r – удлинение образца в момент разрушения; Δl_{0M} – удлинение образца при достижении максимальной нагрузки; x – отрезок на оси удлинения для определения условного предела текучести

Рисунок 1.2 – Машинные диаграммы растяжения «нагрузка F – удлинение Δl » образцов

При проведении испытаний и обработке их результатов используем обозначения, принятые в ГОСТ 11262–80, приложение 1:

- $F_{\max}$ (F_{PM} , рисунок 1.3) – максимальная нагрузка, Н;
- F_r (F_{PP}) – нагрузка, при которой образец разрушился, Н;
- F_s (F_{PT}) – растягивающая нагрузка при достижении предела текучести, Н;
- F_{sx} (F_{PTV}) – растягивающая нагрузка при достижении условного предела текучести, Н;
- A_0 – начальная площадь поперечного сечения образца, мм²;
- Δl_{0M} – изменение расчетной длины образца l_0 в момент достижения максимальной нагрузки, мм;
- Δl_{0P} – изменение расчетной длины образца l_0 в момент разрыва, мм;
- Δl_{0T} – изменение расчетной длины образца l_0 в момент достижения предела текучести, мм.



a – материал имеет предел текучести; *б* – материал не имеет предела текучести

Рисунок 1.3 – Условные диаграммы растяжения

1.2.2 Условная диаграмма растяжения. Машинная диаграмма растяжения в координатах $F - \Delta l$ существенно зависит от размеров образца. Для определения механических характеристик материала диаграмму деформирования строят в относительных координатах $\sigma - \varepsilon$ (нормальное напряжение – относительная продольная деформация):

$$\sigma = \frac{F}{A_0}; \quad \varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0},$$

где A_0 – первоначальная площадь поперечного сечения образца;

l_0 – контрольная (расчетная) длина в средней части образца (область однородного напряженного состояния в соответствии с принципом Сен-Венана).

Значения прочности (нормальные напряжения σ в мегапаскалях или ньютонов, деленный на квадратный миллиметр) и относительные удлинения ε (в процентах) рассчитывают для характерных точек диаграммы. Формулы для расчета приводятся в методических указаниях к лабораторной работе.

Используя данные расчетов, строят условные диаграммы растяжения (см. рисунок 1.3).

На диаграмме растяжения условно рассматривают пять участков.

Участок OB называется зоной упругости, т. к. на этом участке в материале развиваются только упругие деформации (на участке AB наблюдаются незначительные пластические деформации, по величине равные нескольким сотым процента). На большей части зоны упругости (участок OA) соблюдается закон Гука. Точки A и B диаграммы для многих материалов практически совпадают.

Если в этой зоне разгрузить образец, то он возвратится в первоначальное состояние. Напряжение, соответствующее точке A , называется пределом пропорциональности материала.

Свойство материала восстанавливать первоначальную форму и размеры после снятия приложенной нагрузки называется упругостью.

Участок OB плавно переходит в участок BC (см. рисунок 1.3, a): в зону общей текучести или на «площадку текучести». Вид диаграммы на этом участке зависит от особенностей деформирования испытуемого материала и чувствительности измерительной аппаратуры.

Предел текучести – это напряжение σ_{PT} (S – на рисунке 1.3, кривая 1, точка или площадка на кривой), при котором деформации растут без увеличения растягивающей нагрузки.

Способность материала получать большие остаточные деформации без нарушения сплошности (без образования трещин и последующего разрушения) называется пластичностью.

Некоторые материалы не имеют на диаграмме явно выраженной площадки текучести (см. рисунок 1.3, b). В этом случае определяют «условный предел текучести» – напряжение σ_{PTU} (S_X – на рисунке 1.2, кривая 2). Это напряжение определяют графически в точке C (пересечение диаграммы на участке OB с прямой KC , проведенной параллельно прямой OA). Отрезок OK соответствует относительному удлинению ε_{PTU} (x – на рисунке 1.2, кривая 2). Его величина указывается в нормативно-технической документации на материал (если указаний нет, то принимается равной 1 %: образец на длине $l_0 = 100$ мм получает абсолютную деформацию $\Delta l = 1$ мм).

Участок CD называется зоной упрочнения. Материал вновь приобретает способность сопротивляться нагружению. В этой зоне удлинение образца сопровождается ростом нагрузки, хотя и медленнее, чем в зоне упругости. Образец сохраняет первоначальную форму, а его удлинение равномерно распределяется по рабочей длине. Многие материалы при снятии нагрузки на этом участке и повторном нагружении демонстрируют некоторое повышение прочности, т. е. упрочняются (материал становится более жестким, но менее пластичным из-за появления в нем остаточных деформаций). Явление повышения упругих свойств материала в результате предварительного пластического деформирования

ния называется наклепом.

Участок DE называется зоной местной текучести. Она характерна тем, что на образце в месте будущего разрыва образуется местное сужение (*шейка*) и деформация образца носит локальный характер (в области шейки). Пунктирная линия DE' соответствует истинной диаграмме.

Основными механическими характеристиками прочности материала являются следующие ординаты условной диаграммы растяжения $\sigma - \varepsilon$:

1) предел пропорциональности ($\sigma_{ПЦ}$, $\sigma_{РПЦ}$) – это максимальное напряжение, до которого материал подчиняется закону Гука ($\sigma = E\varepsilon$);

2) предел текучести (σ_T , $\sigma_{РТ}$, $\sigma_{РТУ}$) – это минимальное напряжение, при котором происходит интенсивный рост пластической деформации без заметного изменения нагрузки;

3) временное сопротивление (σ_B , $\sigma_{РМ}$) – это напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке, выдержанной образцом.

Временное сопротивление (σ_B , $\sigma_{РМ}$) является условным пределом прочности, т. к. определяется исходя из первоначальной площади поперечного сечения образца A_0 и не является максимальным напряжением.

Наибольшее напряжение ($\sigma_{РРИ}$) – истинное сопротивление разрыву, возникающее в материале в момент его разрушения (см. рисунок 1.3, точка E' на диаграмме), определяется по формуле

$$\sigma_{РРИ} = \frac{F_r}{A_p},$$

где F_r – сила в момент разрушения образца;

A_p – площадь поперечного сечения шейки образца в месте разрыва.

Таким образом, напряжение $\sigma_{РРИ}$ – истинный предел прочности материала, но он не применяется в инженерных расчетах, т. к. соответствует полному исчерпанию его несущей способности.

Пластические свойства материала характеризуют две величины, которые определяются при испытании на растяжение: относительное остаточное удлинение при разрыве δ и относительное остаточное сужение при разрыве ψ (в процентах).

Чем больше значения δ и ψ , тем более пластичным считается материал.

Комплексной характеристикой прочностных и пластических свойств материала (вязкости материала) является удельная работа деформации.

Удельную работу также называют статической вязкостью. Она характеризует способность материала поглощать энергию при разрыве, сопротивляться действию динамических нагрузок, развитию трещин.

Помимо низкоуглеродистой стали, диаграммы растяжения с явно выраженной площадкой текучести имеют, например, такие пластичные материалы, как медь, латунь, некоторые виды бронз, пластмассы, а также многие материалы аддитивного синтеза.

Диаграмма растяжения хрупких материалов не имеет зоны текучести. При испытаниях таких материалов определяют одну механическую характеристику

прочности – временное сопротивление (σ_B , σ_{PM}), которое в этом случае является действительным пределом прочности.

1.3 Результаты испытания

Результаты испытания заносятся в таблицу 1.2 и оформляются в виде протокола испытания.

Таблица 1.2 – Результаты испытаний образца на растяжение

Тип и размер образца			Результат испытания на растяжение					
Тип	Ширина, мм	Толщина, мм	Предел прочности, МПа (Н/мм ²)	Предел пропорциональности, МПа (Н/мм ²)	Предел текучести, МПа (Н/мм ²)	Относительное значение		Вязкость материала, Дж/м ³
						Удлинение, %	Сужение, %	

1.4 Порядок выполнения лабораторной работы

1 Порядок выполнения работы должен соответствовать ГОСТ 11262–80, разд. 1–4 «Отбор образцов», «Аппаратура», «Проведение испытаний», «Обработка результатов».

2 Подробный порядок выполнения работы изложен в методических указаниях по ее выполнению.

Контрольные вопросы

1 Дайте определения характеристикам исследованного материала: предел пропорциональности, предел текучести, предел прочности. Укажите их размерность.

2 В каких координатах строится диаграмма растяжения образца? Материала?

3 В чем отличия диаграмм растяжения пластичного и хрупкого материалов?

4 Как определяются на диаграмме растяжения упругая и пластическая деформации в любой момент нагружения?

5 Укажите на диаграмме площадку текучести.

6 Что называется удельной работой деформации?

7 Какие деформации называются упругими и какие пластическими (остаточными)?

8 Для какого участка диаграммы растяжения справедлив закон Гука?

9 Какие величины характеризуют прочность материала?

10 Какие величины характеризуют пластичность материала?

11 Что такое наклеп?

12 Каким выражением определяется жесткость поперечного сечения при растяжении?

2 Лабораторная работа № 2. Определение механических характеристик материалов аддитивного синтеза при испытании на сжатие

Цель работы

1 Изучить требования ГОСТ 4651–2014 *Пластмассы. Метод испытания на сжатие*, ГОСТ 23206–2017 *Пластмассы ячеистые жесткие. Метод испытания на сжатие*.

2 Изучить поведение материалов аддитивного синтеза при сжатии и определить их основные механические характеристики.

2.1 Порядок работы на испытательной машине

2.1.1 Краткое описание конструкции машины. Испытание выполняется на машине Kason WDW-1. В процессе испытания на сжатие должно быть обеспечено приложение нагрузки вдоль главной оси образца. Для этого используют опорные площадки (компрессионные пластины на сжатие, входящие в комплектацию машины). Поверхности площадок – стальные закаленные и полированные (должно быть обеспечено отклонение от плоскостности в пределах 0,025 мм, а пластины должны быть перпендикулярными к оси нагружения).

Для обеспечения минимального эксцентриситета приложения нагрузки и безопасности проведения экспериментов ГОСТ 25.503–97 рекомендует использовать приспособление, конструкция которого приведена в приложении В (рисунки В.1) данного ГОСТа.

2.1.2 Проведение испытания. Испытание на сжатие и выбор режима испытания должны соответствовать требованиям ГОСТ 4651–2014.

2.1.3 Типоразмеры образцов для испытаний на сжатие. В соответствии с ГОСТ 4651–2014 образцы для испытания должны иметь форму прямоугольной призмы, прямого цилиндра или прямой трубки.

Размеры образцов для испытания должны удовлетворять условию

$$\varepsilon_c^* \leq 0,4 \frac{x^2}{l^2},$$

где ε_c^* – максимальная номинальная относительная деформация при сжатии, которая достигается при испытании, безразмерная величина;

x – диаметр цилиндра, наружный диаметр трубы или толщина (наиболее короткая сторона поперечного сечения) призмы в зависимости от формы образца, мм;

l – длина образца, измеренная параллельно направлению сжимающей силы, мм.

При проведении испытаний на сжатие обычно рекомендуется значение безразмерного коэффициента $x/l \geq 0,4$. Это соответствует максимальной деформации сжатия приблизительно 6 %.

Рекомендуемые размеры образцов для испытания на сжатие приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Рекомендуемые размеры образцов

В миллиметрах

Тип образца	Измеряемый показатель	Длина l	Ширина b	Толщина h
А	Модуль упругости при сжатии	50 ± 2	$10,0 \pm 0,2$	$4,0 \pm 0,2$
Б	Напряжение при сжатии	$10,0 \pm 0,2$	$10,0 \pm 0,2$	$4,0 \pm 0,2$
Для испытания армированных композиций				
В	Напряжение при сжатии	35_{-1}^{+0}	$25 \pm 0,5$	От 2 до 3
Г	Напряжение при сжатии	40_{-1}^{+0}	$25 \pm 0,5$	От 3 до 4
Д	Напряжение при сжатии	45_{-2}^{+0}	$25 \pm 0,5$	От 4 до 5
Е	Напряжение при сжатии	50_{-2}^{+0}	$25 \pm 0,5$	От 5 до 6
<i>Примечания</i> 1 Допускается использовать образцы длиной $(15,0 \pm 0,2)$ мм и (30 ± 2) мм. 2 Допускается использовать образцы длиной от 10 до 40 мм при значении безразмерного коэффициента x/l, равном 0,67. 3 При испытании образцов из армированных композиций допускается закреплять образцы в приспособлении во избежание потери устойчивости образцов				

2.2 Теоретические сведения

2.2.1 Пластичность и хрупкость. Способность материала получать большие остаточные деформации без нарушения сплошности (без образования трещин и последующего разрушения) называют пластичностью. Противоположным является свойство хрупкости, т. е. способность материала разрушаться без образования заметных остаточных деформаций.

Эти характеристики зачастую зависят от условий нагружения (температуры, скорости деформации и т. д.): хрупкий материал может перейти в пластичный и наоборот. То есть речь идет о хрупком или пластичном состоянии материала.

2.2.2 Диаграммы сжатия. Вид типичных кривых при данном виде испытаний (диаграмм сжатия) такой же, как и при растяжении (см. рисунок 1.3). При испытании на сжатие напряжение σ и деформация ε отрицательны, но обычно отрицательный знак опускается (рисунок 2.1).

В соответствии с рекомендациями ГОСТ 4651–2014 используются следующие термины и обозначения:

- расчетная длина L_0 , мм;
- скорость испытания V , мм/мин;
- напряжение при сжатии σ (σ_C), МПа;

а) напряжение при пределе текучести σ_y (σ_{CT}) (см. рисунок 2.1, а);
 б) максимальное напряжение σ_M (σ_{CM});
 в) разрушающее напряжение σ_B (σ_{CP});
 г) напряжение при установленной относительной деформации (x , %) σ_x (σ_{CD}), МПа: если, например, материал не имеет предела текучести (см. рисунок 2.1, б);

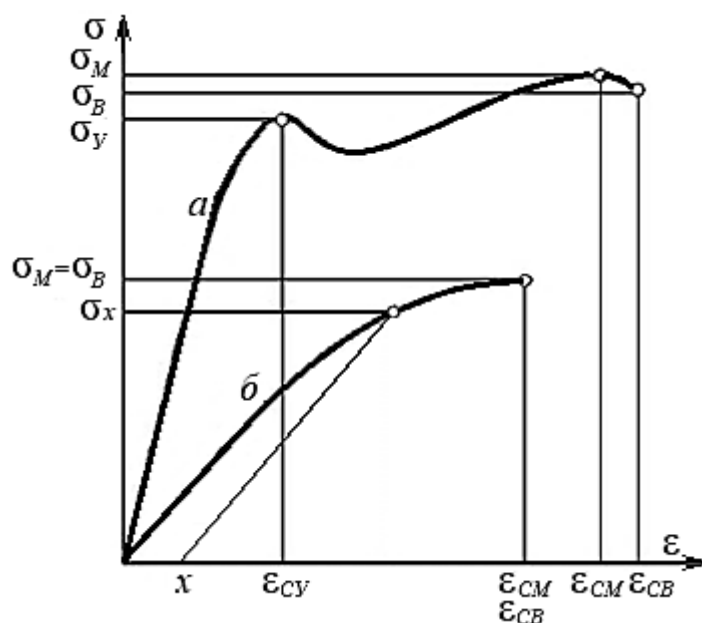
– номинальная относительная деформация при сжатии ϵ , проценты или безразмерная величина:

а) номинальная относительная деформация при сжатии при пределе текучести ϵ_{cy} (ϵ_{CT});

б) номинальная относительная деформация при сжатии при максимальном напряжении при сжатии ϵ_{cm} ;

в) номинальная относительная деформация при сжатии при разрушении ϵ_{cb} (ϵ_{CP});

– модуль упругости при сжатии E_c , МПа.



а – материал имеет предел текучести; б – материал не имеет предела текучести

Рисунок 2.1 – Типичные диаграммы при испытании пластмасс на сжатие

2.2.3 Особенности деформирования материалов. Образец из пластичного материала после испытания имеет вид, представленный на рисунке 2.2. Для таких материалов не определяется предел прочности. По результатам испытания определяется физический предел текучести или условный предел текучести (см. рисунок 2.1).

Образец из хрупкого материала после испытания имеет вид, представленный на рисунке 2.3, а. Для таких материалов предел текучести не определяется.

Разрушение образцов происходит по плоскостям, параллельным оси образца, или по плоскостям, наклоненным к оси под углом 45° , совпадающим с

направлением площадок, по которым действуют максимальные касательные напряжения.

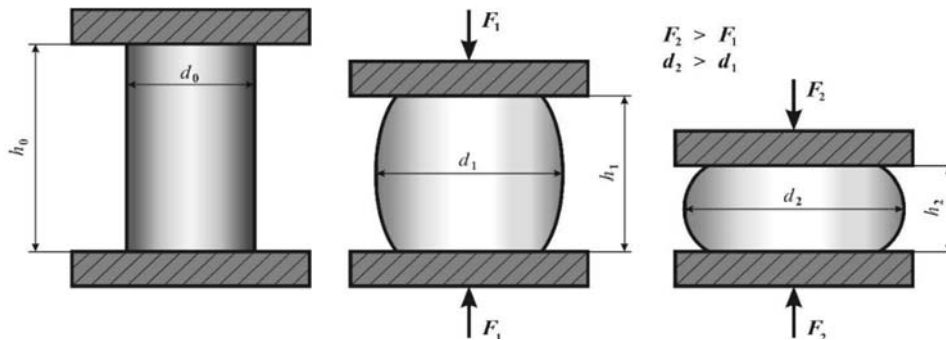


Рисунок 2.2 – Вид образца из пластичного материала при испытании на сжатие

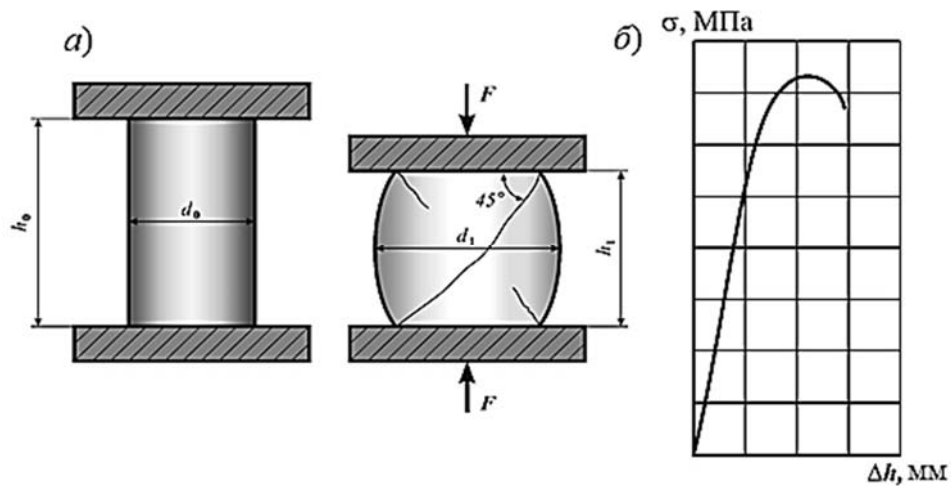


Рисунок 2.3 – Вид образца из хрупкого материала при испытании на сжатие и диаграмма сжатия

Диаграмма сжатия хрупкого материала представляет собой нелинейную зависимость с малыми деформациями, быстрым ростом нагрузки, а испытание заканчивается разрушением образца (см. рисунок 2.3, б).

По максимальной нагрузке определяют предел прочности материала на сжатие, который является основным показателем, характеризующим хрупкий материал.

Анизотропными являются материалы [15–17], армированные прямолинейными волокнами, тканями, хаотически расположенными непрерывными или короткими волокнами, частицами и иным способом. В большинстве своем они обладают свойством анизотропии прочности, т. е. зависимостью свойств материала от направления, по которому прикладывается нагрузка.

Образец из анизотропного материала (например, дерево) после испытания имеет вид, представленный на рисунке 2.4.

При сжатии вдоль волокон дерево выдерживает значительно большие нагрузки, чем при сжатии поперек волокон. При этом имеет место и разный характер разрушения. При сжатии деревянных образцов вдоль волокон разруше-

ние происходит в результате сдвига слоев в плоскости, наклоненной к продольной оси под углом $45^\circ \dots 60^\circ$ (см. рисунок 2.4, а).

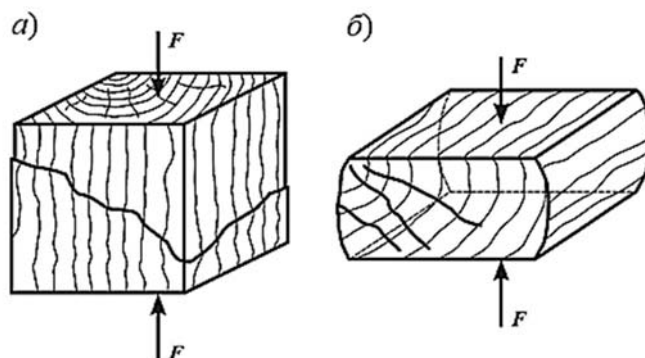


Рисунок 2.4 – Вид образца из анизотропного материала при сжатии

При сжатии образцов поперек волокон деформация происходит при почти постоянной или при незначительно повышающейся нагрузке, несмотря на то, что начинают обнаруживаться внешние признаки разрушения материала и становятся видны значительные трещины (см. рисунок 2.4, б).

Определяются пределы прочности по двум направлениям (для дерева – вдоль и поперек волокна) и коэффициент анизотропии как отношение пределов прочности по этим направлениям.

2.3 Результаты испытания на сжатие

Образец для испытания подвергают сжатию вдоль его главной оси с постоянной скоростью до разрушения или до тех пор, пока нагрузка или уменьшение длины образца не достигнут заданного значения. Нагрузку, которую прикладывают к образцу, измеряют в течение всего процесса испытания. Результаты испытания заносятся в таблицы 2.2 и 2.3.

Таблица 2.2 – Результаты испытания на сжатие

Номер образца	Размер образца				Нагрузка, Н		
	Ширина, мм	Толщина, мм	Длина, мм	Площадь поперечного сечения, мм ²	при пределе текучести	максимальная, выдержанная образцом	разрушающая

Таблица 2.3 – Расчетные значения напряжений и деформаций испытания на сжатие

Нормальное напряжение, МПа				Относительная деформация, %		
при пре- деле те- кучести σ_y (σ_{CT})	максималь- ное σ_M (σ_{CM})	разрушаю- щее σ_B (σ_{CP})	при установ- ленной отно- сительной деформации (x , %) σ_x (σ_{CD})	относитель- ная (номи- нальная)	при пре- деле те- кучести ε_{cy} (ε_{CT})	номиналь- ная при разрушении ε_{CB} (ε_{CP})

2.4 Порядок выполнения лабораторной работы

1 Порядок выполнения работы должен соответствовать ГОСТ 4651–2014, разд. 5–10 «Аппаратура», «Образцы для испытаний», «Кондиционирование образцов», «Проведение испытаний», «Обработка результатов».

2 Подробный порядок выполнения работы изложен в методических указаниях по ее выполнению.

Контрольные вопросы

1 Дайте определения пластичности и хрупкости материала.

2 Какие механические характеристики определяются при сжатии пластичных материалов?

3 Какие механические характеристики определяются при сжатии хрупких материалов?

4 Чем отличаются диаграммы сжатия пластичных и хрупких материалов?

5 Почему при сжатии пластичных материалов не происходит разрушение образца?

6 Как изменилась форма образца из пластического материала при испытании на сжатие?

3 Лабораторная работа № 3. Определение механических характеристик материалов аддитивного синтеза при испытании на статический изгиб

Цель работы

1 Изучить требования ГОСТ 4648–2014 *Пластмассы. Метод испытания на статический изгиб*.

2 Изучить поведение материалов аддитивного синтеза при статическом изгибе и определить показатели сопротивления изгибу.

3.1 Порядок работы на испытательной машине

3.1.1 *Краткое описание конструкции машины.* Испытание выполняется на машине Kason WDW-1. В соответствии с требованиями ГОСТ 4648–2014 на испытательной машине должно быть размещено приспособление для испытания на статический изгиб (рисунок 3.1) в комплекте: наконечник $r_1 = 5,0$ мм и опоры $r_2 = 0,5$ мм (для образцов толщиной до 3 мм) и $r_2 = 2,0$ мм (для образцов толщиной свыше 3 мм).

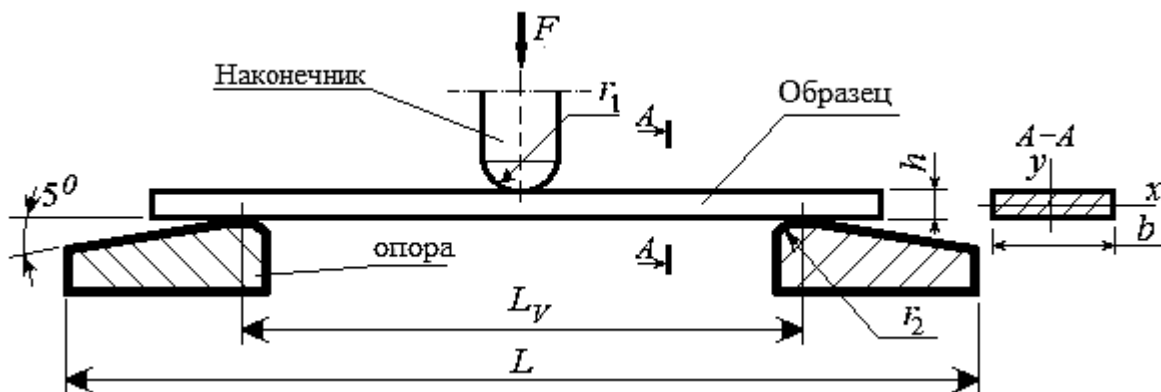


Рисунок 3.1 – Приспособление для испытания на статический изгиб

3.1.2 *Проведение испытания.* Испытание на статический изгиб и выбор режима испытания должны соответствовать требованиям ГОСТ 4648–2014. Порядок проведения испытания соответствует п. 2.2.2 данного ГОСТа с учетом особенностей нагружения.

3.1.3 *Типоразмеры образцов для испытаний на изгиб.* Образцы для испытаний представляют собой пластину. ГОСТ 4648–2014, разд. 2, устанавливает следующие размеры стандартного образца: длина L – не менее 80 мм; ширина $b = (10,0 \pm 0,50)$ мм; толщина $h = (4,0 \pm 0,20)$ мм. В п. 2.1.2 данного ГОСТа указаны частные случаи выбора размеров образцов, пп. 2.1.3–2.1.6 определяют требования к подготовке образцов, а п. 2.4 – режимы кондиционирования их.

3.2 Теоретические сведения

Под изгибом понимается такой вид нагружения бруса, при котором в его поперечных сечениях действуют изгибающие моменты $M_{изг}$. В результате возникают нормальные σ и касательные τ напряжения. Величина касательных напряжений, в сравнении с нормальными, мала, поэтому ими пренебрегают.

Расчеты нормальных напряжений σ в поперечном сечении образца, а также осевого момента сопротивления его прямоугольного сечения W_x выполняются с учетом рекомендаций [5, 7]. В формуле Навье:

- M_x – изгибающий момент в сечении посередине балки, который для используемой в данной работе схемы нагружения имеет максимальное значение;
- I_x – осевой момент инерции сечения балки относительно его нейтральной линии, совпадающей с главной центральной осью инерции сечения x ;
- y – расстояние от нейтральной линии (ось x) до слоя поперечного сечения, в котором определяется напряжение.

В соответствии с ГОСТ 4648–2014 на статический изгиб испытывают неармированные и армированные пластмассы. Стандарт не распространяется на ячеистые пластмассы.

Образец из испытуемого материала, свободно лежащий на двух опорах (см. рисунок 3.1), нагружают статической нагрузкой, прикладываемой в середине между опорами.

В соответствии с ГОСТ 4648–2014 используются термины:

- прогиб – вертикальное перемещение центра тяжести поперечного сечения бруса. Прогиб образца определяется расстоянием, на которое отклоняется от своего первоначального положения верхняя или нижняя поверхность испытуемого образца при приложении нагрузки в середине между опорами;
- изгибающее напряжение в данный момент испытания – максимальное нормальное напряжение, возникающее на противоположной поверхности по отношению к нагруженной стороне образца в сечении в середине пролета;
- изгибающее напряжение при заданном значении прогиба – нормальное напряжение, возникающее при значении прогиба, равном 1,5 толщины образца ($1,5h$);
- изгибающее напряжение при максимальной нагрузке – нормальное напряжение, возникающее в момент, когда нагрузка достигает первого максимума;
- изгибающее напряжение при разрушении образца – нормальное напряжение, возникающее в момент разрушения образца.

3.3 Результаты испытания

Образец устанавливается на опоры широкой стороной, причем той, которая не подвергалась механической обработке.

Расстояние между опорами должно быть $L_V = (15 \dots 17) h$.

Образец для испытаний должен иметь следующие размеры:

- $h \times b = 5 \times 10$ мм и длиной $L = 120$ мм – для неармированных пластмасс;

– $h \times b = 10 \times 15$ мм и длиной $L = 250$ мм – для армированных.

Расстояние L_V устанавливают соответственно 100 и 230 мм.

Скорость относительного перемещения нагружающего наконечника, мм/мин, определяется расчетом по формуле

$$v = \frac{0,01L_V^2}{6h}.$$

Испытания продолжают до разрушения образца или до достижения заданной максимальной нагрузки, определяя нагрузку и прогиб (ГОСТа 4648–71, пп. 3.6–3.9).

Порядок обработки результатов испытания изложен в ГОСТа 4648–71, п. 4.

Изгибающий момент в середине между опорами (см. рисунок 3.1) определяется по формуле

$$M = \frac{FL_V}{4},$$

где F – нагрузка, Н;

L_V – расстояние между опорами, мм.

Максимальные изгибающие напряжения (МПа = Н/мм²) при поперечном изгибе образца силой F

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W_x} = \frac{FL_V}{4bh^2} = \frac{3F \cdot L_V}{2bh^2}.$$

Образец лежит на опорах широкой стороной, следовательно, осевой момент сопротивления поперечного сечения будет минимальным. Кроме того, опорные сечения образца скользят на опорах. Поэтому прогиб будет увеличиваться за счет действия продольного изгиба от силы F_α (рисунок 3.2). Поэтому ГОСТ 4648–71 в расчете напряжений рекомендует учитывать горизонтальную составляющую изгибающего момента.

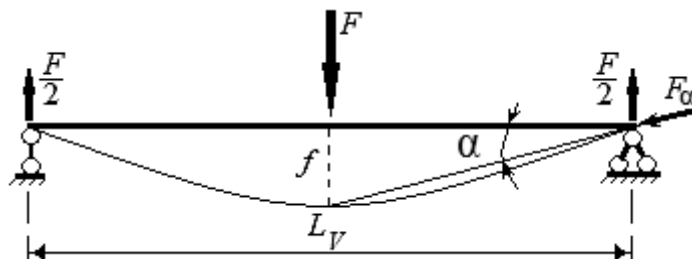


Рисунок 3.2 – К учету действия продольного изгиба

Таким образом, величина напряжений при продольно-поперечном изгибе будет определяться суммой напряжений:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W_x} + \frac{F_a f}{W_x},$$

где F_a – составляющая реакции, Н;

f – прогиб образца в середине между опорами, определенный экспериментально, мм.

По ГОСТ 4648–71 максимальные напряжения определяются выражением

$$\sigma_{\max} = \frac{3F \cdot L_V}{2bh^2} \left(1 + \frac{4f^2}{L_V^2} \right).$$

Размеры образцов (толщину h и ширину b) измеряют в середине длины образца с точностью не менее 0,01 мм.

Экспериментально определяются следующие показатели:

– изгибающее напряжение и значение прогиба в момент разрушения для пластмасс, разрушающихся при заданной величине прогиба или до достижения этой величины;

– изгибающее напряжение при заданном значении прогиба для пластмасс, не разрушающихся при заданной величине прогиба или до достижения этой величины;

– изгибающее напряжение при максимальной нагрузке для пластмасс, у которых при заданной величине прогиба или до достижения этой величины нагрузка проходит через максимум;

– изгибающее напряжение при разрушении или при максимальной нагрузке, когда прогиб превышает заданное значение ($1,5h$).

Результаты испытания заносятся в таблицы 3.1 и 3.2 и оформляются в виде протокола испытания.

Таблица 3.1 – Результаты испытания на статический изгиб

Номер образца	Размер образца, мм			Расстояние между опорами L_V , мм	Заданное значение прогиба f , мм	Результат испытания на статический изгиб	
	Ширина b	Толщина h	Площадь поперечного сечения, мм ²			Разрушающая или заданная нагрузка, Н	Прогиб образца в середине между опорами f , мм

Протокол испытаний должен содержать:

- ссылку на настоящий стандарт;
- наименование и марку пластмассы;
- способ изготовления образца;
- условия испытания;

– результаты испытания в зависимости от особенностей разрушения (см. таблицу 3.2).

Таблица 3.2 – Испытание на статический изгиб: значения напряжений и деформаций

Изгибающее напряжение, МПа			Прогиб f , мм		
при разрушении образца (в момент разрушения)	при отсутствии разрушения образца		при разрушении образца (в момент разрушения)	при отсутствии разрушения образца (при максимальном значении нагрузки)	
	при заданном прогибе	при максимальном значении нагрузки			

3.4 Порядок выполнения лабораторной работы

1 Порядок выполнения работы соответствует ГОСТ 4648–2014, разд. 1–4 «Аппаратура», «Подготовка к испытанию (размеры и кондиционирование образцов)», «Проведение испытаний», «Обработка результатов».

2 Подробный порядок выполнения работы изложен в методических указаниях по ее выполнению.

Контрольные вопросы

1 Как вычисляется изгибающий момент в поперечном сечении образца?

2 По какой формуле определяются нормальные напряжения в поперечном сечении балки и как они изменяются по высоте образца?

3 Какой линией очерчивается эпюра нормальных напряжений по высоте сечения балки при изгибе?

4 По какой формуле определяется осевой момент сопротивления поперечного сечения образца?

5 В каком слое поперечного сечения образца нормальные напряжения максимальны?

6 Какая нагрузка определяется по результатам испытания?

7 Какой вид нагружения называется поперечным изгибом?

8 Какой вид нагружения называется продольно-поперечным изгибом?

4 Лабораторная работа № 4. Определение модуля упругости первого рода материалов аддитивного синтеза

Цель работы

1 Изучить требования ГОСТ 9550–81 *Пластмассы. Методы определения модуля упругости при растяжении, сжатии и изгибе.*

2 Определить модули упругости материалов при различных видах нагружения.

4.1 Порядок работы на испытательной машине

4.1.1 Краткое описание конструкции машины. Испытания выполняются на машине Kason WDW-1.

Испытания по определению модуля упругости при растяжении, сжатии и изгибе и выбор режимов испытаний должны соответствовать требованиям ГОСТ 9550–81.

Испытательная машина должна обеспечивать скорость деформации образца, равную $(1,0 \pm 0,5) \%$ в минуту.

4.1.2 Проведение испытаний. Перед испытанием образцы кондиционируют в стандартной атмосфере по ГОСТ 12423–66 не менее 16 ч.

Размеры и вид образцов должны соответствовать ГОСТ 11262–80 (растяжение), ГОСТ 4651–82 (сжатие), ГОСТ 4648–71 (изгиб).

Испытания проводятся в соответствии с ГОСТ 12423–66 при температуре $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ и относительной влажности $(50 \pm 5) \%$.

Графическую запись нагрузки и деформации проводят в следующем масштабе: 100...150 мм на диаграмме должно соответствовать: 0,4 % относительного удлинения (испытание на растяжение), относительной деформации сжатия, равной значениям относительного укорочения (испытание на сжатие); значений прогиба, соответствующих значениям относительной деформации крайних волокон (испытание на изгиб).

Не менее 100 мм на диаграмме должно соответствовать приращению нагрузки, соответствующему увеличению соответствующей относительной деформации на 0,4 %.

Результаты испытания заносятся в таблицы 4.1–4.3 и оформляются в виде протокола испытания.

Протокол испытаний должен содержать:

- ссылку на настоящий стандарт;
- наименование и марку пластмассы;
- условия подготовки испытуемого образца;
- условия испытания;
- метод испытания;
- тип и марку прибора для измерения деформации;

- тип испытуемого образца (форма, размеры);
- количество образцов, взятых для испытания.

Таблица 4.1 – Результаты испытания по определению модуля упругости при растяжении

Размер образца, соответствующий меткам, мм			Среднее значение размеров, мм	Площадь поперечного сечения A_0 , мм ²	F_1 , Н	F_2 , Н	Δl_1 , мм	Δl_2 , мм	E_P , МПа
I	II	III							

Таблица 4.2 – Результаты испытания по определению модуля упругости при сжатии

Площадь поперечного сечения A_0 , мм ²	F_1 , Н	F_2 , Н	Δh_1 , мм	Δh_2 , мм	E_C , МПа

Таблица 4.3 – Результаты испытания по определению модуля упругости при изгибе

h , мм	b , мм	F_1 , Н	F_2 , Н	z_1 , мм	z_2 , мм	$E_{ИЗГ}$, МПа

4.2 Теоретические сведения

Модулем упругости E называется мера жесткости материала, характеризующаяся сопротивлением развитию упругих деформаций.

Модуль упругости определяется как отношение приращения напряжения к соответствующему приращению деформации.

Скоростью деформации называется изменение относительной деформации растяжения или сжатия в единицу времени.

Скорость деформации при растяжении определяют отношением скорости перемещения подвижного элемента испытательной машины v к длине образца между кромками зажимов или сжимающими площадками.

При испытании на растяжение скорость деформации не должна превышать 20 мм/мин.

При испытании на сжатие и изгиб скорость деформации v вычисляют по формулам, приведенным в пп. 4.4 и 4.5.

4.3 Определение модуля упругости при растяжении

Форма и размеры образцов приведены в лабораторной работе № 1 (см. рисунок 1.1 и таблицу 1.1).

Перед испытанием на образец наносятся метки. Толщину и ширину образца измеряют в трех местах – метках I, II, III: в середине и на расстоянии 5 мм от

этих меток.

Количество образцов, взятых для испытания одной партии материала, а для анизотропных материалов – в каждом из выбранных направлений, должно быть не менее трех.

Образец закрепляют в машину так, чтобы продольные оси зажимов и ось образца совпадали с линией, соединяющей точки крепления зажимов на испытательной машине.

На образце, закрепленном в зажимах, проводят установку и настройку прибора для измерения удлинения.

Нагружение осуществляют до величины относительного удлинения, равной 0,5 %.

По диаграмме определяют значения нагрузки (в процентах), соответствующие величинам относительного удлинения $\varepsilon_1 = 0,1 \%$ и $\varepsilon_2 = 0,3 \%$:

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta l_1}{l_0} 100; \quad \varepsilon_2 = \frac{\Delta l_2}{l_0} 100.$$

Модуль упругости при растяжении E_P , МПа, вычисляют по формуле

$$E_P = \frac{(F_2 - F_1)l_0}{A_0(\Delta l_2 - \Delta l_1)},$$

где F_2 – нагрузка, соответствующая относительному удлинению 0,3 %, Н;

F_1 – нагрузка, соответствующая относительному удлинению 0,1 %, Н;

l_0 – расчетная длина образца, мм;

A_0 – площадь начального поперечного сечения образца, мм²;

Δl_2 – удлинение, соответствующее нагрузке F_2 , мм;

Δl_1 – удлинение, соответствующее нагрузке F_1 , мм.

4.4 Определение модуля упругости при сжатии

База измерения деформации должна составлять не менее 10 мм, но не более 2/3 высоты образца при измерении деформации прибором, установленным на образце.

Для испытаний используются образцы в форме прямоугольной призмы квадратного сечения со стороной a .

Высоту h образца, мм, вычисляют в зависимости от гибкости λ и ширины основания a по формуле

$$h = \frac{\lambda}{3,46} a.$$

Значение гибкости λ принимается равным 10. Если же в процессе испытания образец теряет устойчивость, гибкость уменьшают до 6.

Высоту образца устанавливают от 10 до 40 мм. Предпочтительная высота

образца 30 мм, тогда ширина основания будет равна 10,4 мм.

Скорость испытания v , мм/мин, устанавливается в зависимости от принятой высоты образца:

$$v = 0,03 \frac{h}{t},$$

где h – высота образца, мм;

t – время нагружения (постоянная величина), равное 1 мин.

Прибор для измерения деформации сжатия должен обеспечивать измерение с погрешностью не более 0,002 мм.

Образец устанавливают на опорных плитах испытательной машины так, чтобы продольная ось образца совпадала с направлением действия силы.

Устанавливают прибор для измерения деформации. Деформацию при сжатии определяют измерением расстояния между площадками или по изменению базы на образце.

Нагружение осуществляют до величины деформации 0,5 %.

По диаграмме определяют значения нагрузки (в процентах), соответствующие величинам относительной деформации укорочения $\varepsilon_1 = 0,1$ % и $\varepsilon_2 = 0,3$ %:

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta h_1}{h_0} 100; \quad \varepsilon_2 = \frac{\Delta h_2}{h_0} 100.$$

Модуль упругости при сжатии E_c , МПа, вычисляют по формуле

$$E_c = \frac{(F_2 - F_1)h_0}{A_0(\Delta h_2 - \Delta h_1)},$$

где F_2 – нагрузка, соответствующая относительной деформации 0,3 %, Н;

F_1 – нагрузка, соответствующая относительной деформации 0,1 %, Н;

h_0 – начальная высота образца или базы, мм;

A_0 – площадь начального поперечного сечения образца, мм²;

Δh_2 – изменение высоты или базы, соответствующее нагрузке F_2 , мм;

Δh_1 – изменение высоты или базы, соответствующее нагрузке F_1 , мм.

4.5 Определение модуля упругости при изгибе

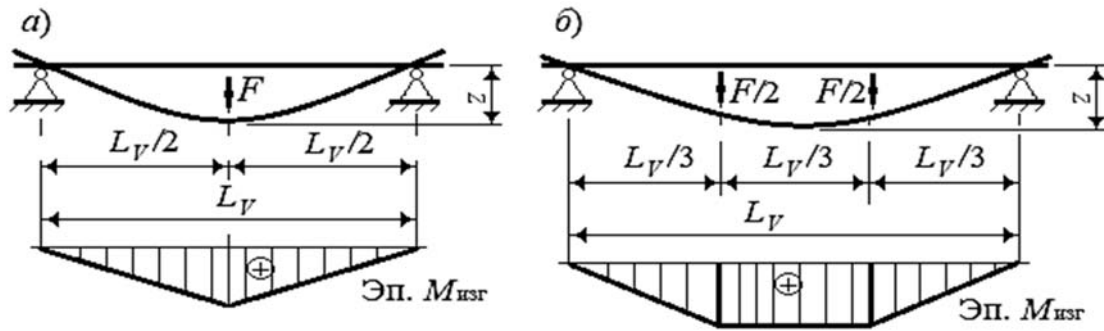
Прибор для измерения деформации образца должен обеспечивать измерение с погрешностью не более 0,01 мм.

Испытания на изгиб проводят одним из методов:

– метод А – по трехточечной схеме (рисунок 4.1, а);

– метод Б – при нагружении по четырехточечной схеме парой наконечников, расположенных в средней трети расстояния между опорами (рисунок 4.1, б).

Прогиб измеряют: в методе А – в середине расстояния между опорами, а в методе Б – в соответствии с рисунком 4.1, б. Величину прогиба оценивают по величине перемещения подвижной части нагружающего устройства.



a – трехточечная схема; *б* – четырехточечная схема

Рисунок 4.1 – Схемы методов испытаний при определении модуля упругости материала при изгибе образца

Расстояние между опорами L_v устанавливают в зависимости от толщины образца h в пределах $(15...17)h$, мм, и измеряют с погрешностью не более 0,5 %.

На образце, лежащем на опорах, осуществляют установку и настройку прибора для измерения прогиба.

Скорость деформации определяется по формулам:

– для метода А

$$v = \frac{u \cdot L_v^2}{6h};$$

– для метода Б

$$v = 0,185 \frac{u \cdot L_v^2}{h},$$

где u – скорость относительной деформации крайних волокон образца, равная 0,01 мин⁻¹;

L_v – расстояние между опорами, мм;

h – толщина образца, мм.

Нагружение осуществляют до величины относительной деформации крайних волокон 0,5 %.

Относительную деформацию крайних волокон ε вычисляют по формулам:

– для метода А

$$\varepsilon = \frac{6zh}{L_v^2};$$

– для метода Б

$$\varepsilon = \frac{zh}{0,185L_v^2},$$

где z – значение прогиба, мм.

Если образцы разрушаются до достижения относительной деформации крайних волокон 0,5 %, нагружение осуществляют до меньшей величины деформации, установленной в нормативно-технической документации на конкретную продукцию.

Размеры образцов (толщину h и ширину b) измеряют в середине длины образца с точностью не менее 0,01 мм.

По диаграмме определяют значения нагрузки и прогиба, соответствующие значениям относительной деформации крайних волокон 0,1 % и 0,3 %.

Модуль упругости при изгибе $E_{изг}$, МПа, вычисляют по формулам:

– для метода А

$$E_{изг} = \frac{L_V^3 (F_2 - F_1)}{4bh^3 (z_2 - z_1)};$$

– для метода Б

$$E_{изг} = \frac{0,185 L_V^3 (F_2 - F_1)}{bh^3 (z_2 - z_1)},$$

где L_V – расстояние между опорами, мм;

F_2 – нагрузка при величине относительной деформации крайних волокон, равной 0,3 %, Н;

F_1 – нагрузка при величине относительной деформации крайних волокон, равной 0,1 %, Н;

b – ширина образца, мм;

h – толщина образца, мм;

z_2 – прогиб образца, мм, соответствующий относительной деформации крайних волокон, равной 0,3 %;

z_1 – прогиб образца, мм, соответствующий относительной деформации крайних волокон, равной 0,1 %.

Контрольные вопросы

1 Какие формы образцов и схемы испытаний используются для определения модулей упругости полимеров при растяжении, сжатии и изгибе?

2 Опишите методику определения модуля упругости полимеров при различных видах нагружения.

3 Дайте определение модуля упругости материала.

4 Как определяется относительная линейная деформация образца?

5 В каких координатах строятся диаграммы деформирования материала при растяжении, сжатии и изгибе?

5 Лабораторная работа № 5. Опытное определение характеристик ползучести материалов аддитивного синтеза

Цель работы

1 Ознакомиться с явлением ползучести.

2 Изучить требования ГОСТ 3248–81 *Металлы. Метод испытания на ползучесть*, ГОСТ Р 57714–2017 *Композиты полимерные. Определение ползучести при растяжении, при сжатии и разрушения при ползучести*, ГОСТ 28845–90 *Машины для испытания материалов на ползучесть, длительную прочность и релаксацию*.

3 Выполнить исследование на ползучесть материалов аддитивного синтеза и материалов, изготовленных в производственных условиях.

4 Построить для исследованных материалов кривые ползучести при постоянных температуре и напряжении.

5.1 Теоретические сведения

Многие элементы конструкций работают достаточно длительное время в условиях высоких температур и уровней напряжений. При этом материалы обнаруживают свойства ползучести и релаксации. Эти свойства называют реологическими.

Ползучесть – это увеличение деформаций во времени при постоянных напряжениях и температуре.

Ползучесть у различных материалов обнаруживается в зависимости от величин действующих напряжений, температуры окружающей среды и времени работы элемента конструкции.

Обычно характеристики ползучести устанавливаются в результате испытания образцов на осевое растяжение при постоянных значениях температуры и напряжений (рисунок 5.1).

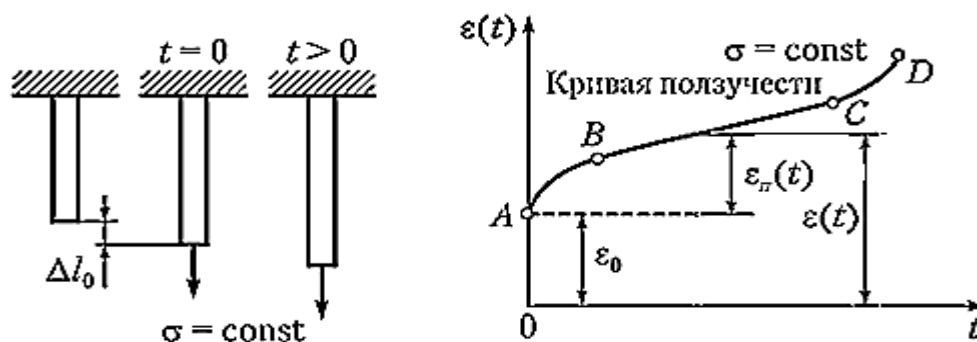


Рисунок 5.1 – Схема испытания на ползучесть и кривая ползучести

В начальный момент времени ($t = 0$) к образцу прикладывается сила, и далее ($t > 0$) возникающее в процессе испытания напряжение поддерживается постоянным. В фиксированные моменты времени замеряют абсолютное удлине-

ние образца, рассчитывают относительную деформацию и строят кривую ползучести.

При приложении нагрузки возникает «мгновенная» деформация ε_0 . В зависимости от величины прикладываемого напряжения, температуры испытания и материала эта деформация может быть или упругой, или упругопластической.

В последующие моменты времени к этой деформации добавляется увеличивающаяся во времени деформация ползучести $\varepsilon_{II}(t)$.

Таким образом, в произвольный момент времени полная деформация складывается из мгновенной деформации ε_0 и деформации ползучести ε_{II} :

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + \varepsilon_{II}(t).$$

Кривая ползучести при достаточно высоких уровнях напряжений имеет три характерных участка.

Участок AB – участок неустановившейся ползучести. На этом участке скорость деформации ползучести переменна, она изменяется от бесконечности в точке A до некоторой конечной величины в точке B .

Участок BC – участок установившейся ползучести. В пределах этого участка скорость деформации ползучести не изменяется во времени и зависит лишь от температуры и уровня напряжений.

Участок CD – характеризуется увеличением скорости деформации ползучести и заканчивается разрушением.

Если уровни напряжений и температуры невелики, то ползучесть носит ограниченный характер. При этом кривая ползучести имеет асимптоту.

Очень часто на графике изображается зависимость от времени только деформации ползучести. При этом ось времени проходит через точку A .

Кривые ползучести для разных материалов имеют свои особенности.

Обычно статические испытания на ползучесть и релаксацию проводят при повышенных температурах и длительном воздействии нагрузок.

Например, в резине развиваются необратимые (остаточные) деформации (происходит старение, или необратимое изменение свойств в напряженном состоянии), т. е. протекают так называемые химические ползучесть и релаксация.

На характер кривых ползучести оказывают также влияние различные факторы: уровни напряжений, температура и время испытания и др.

Процесс ползучести следует рассматривать как процесс накопления повреждений, приводящий к полному разрушению материала, когда происходит исчерпание деформационной способности материала.

Результаты экспериментов на ползучесть имеют достаточно большой разброс, поэтому решение задач ползучести с точностью до 20 % считают допустимым.

5.2 Порядок проведения испытания на ползучесть

Порядок проведения испытания на ползучесть, материал и размеры образца, методика обработки результатов испытания приводятся в соответствующих методических указаниях (находятся в лаборатории).

Контрольные вопросы

- 1 Что такое ползучесть материала?
- 2 Имеет ли место ползучесть материала при комнатной температуре?
- 3 При какой минимальной температуре наблюдается ползучесть бронзы, алюминия, латуни?
- 4 Имеет ли место ползучесть в пластмассах?
- 5 При каких способах деформирования образца можно проводить испытание на ползучесть?
- 6 В каких координатах строится кривая ползучести?
- 7 На каком участке кривой будет постоянная скорость деформации?
- 8 Назовите факторы, влияющие на скорость деформирования.
- 9 Наблюдается ли ползучесть стали при обычной температуре?
- 10 Как определяется скорость ползучести?

6 Лабораторная работа № 6. Опытное определение характеристик релаксации напряжений материалов аддитивного синтеза

Цель работы

- 1 Ознакомиться с явлением релаксации.
- 2 Изучить требования ГОСТ 28845–90 *Машины для испытания материалов на ползучесть, длительную прочность и релаксацию.*
- 3 Выполнить исследование на релаксацию материалов аддитивного синтеза и материалов, изготовленных в производственных условиях.
- 4 Построить для исследованных материалов кривые релаксации при постоянных температуре и деформации.

6.1 Теоретические сведения

Релаксация напряжения и ползучесть отражают одни и те же явления, хотя и противоположным образом. Изучение ползучести более важно с практической точки зрения.

Однако метод релаксации напряжения чаще используют в научных исследованиях, поскольку он легче поддается математической обработке.

Релаксация напряжений – это уменьшение напряжения во времени при постоянных деформациях и температуре (рисунок 6.1).

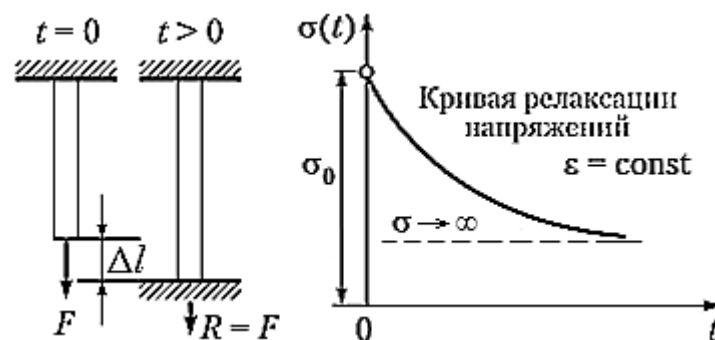


Рисунок 6.1 – Схема испытания на релаксацию напряжений и кривая релаксации напряжений

Это процесс самопроизвольного изменения (обычно уменьшения) напряжений в нагруженных деталях при постоянной полной деформации. При этом снижение напряжений происходит вследствие постепенного уменьшения упругой деформации и приращения на ту же величину вязкоупругой и вязкопластической составляющих деформации (для металлов чаще на величину вязкопластической деформации):

$$\varepsilon(0) = \varepsilon_{упр} + \varepsilon_{п} = \text{const},$$

где $\varepsilon_{упр}$ – упругая часть деформации, соответствующая напряжению $\sigma(t)$;

$\varepsilon_{п}$ – деформация ползучести, нарастающая во времени при снижающихся напряжениях.

Релаксация напряжений сопровождается переходом части упругих деформаций в пластические, поэтому соединения, выполненные с натягом, при длительной работе ослабевают.

В металлических образцах при высоких температурах напряжение часто убывает до нуля. При испытаниях на релаксацию оценивают уменьшение макронапряжений во всем образце. Типичным примером детали, работающей в условиях релаксации напряжений, является болт фланцевого соединения. Плотность этого соединения определяется усилием натяга болта, который создается вследствие его упругой деформации. С течением времени натяг болта (уровень деформации) будет ослабевать, т. к. часть упругой деформации будет переходить в пластическую.

Испытания образцов на релаксацию напряжений проводят на тех же испытательных машинах и в тех же условиях, что и испытания образцов на ползучесть. Исключение заключается в том, что после приложения начальной полной нагрузки необходимо обеспечить неизменность начальной деформации во времени.

Процесс испытания на релаксацию напряжений можно представить так: образец длиной l закладывается в захваты испытательной машины, растягивается на величину Δl и оставляется в этом положении (рисунок 6.2).

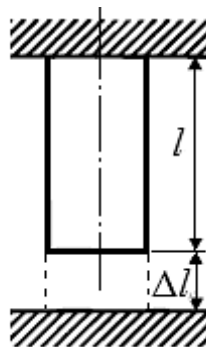


Рисунок 6.2 – Схема релаксационного процесса

Полная деформация ε в начале деформирования равна упругой $\varepsilon_{упр} = \Delta l/l$, которая, в свою очередь, постоянна во времени. С течением времени упругая деформация переходит в пластическую.

Процесс релаксации можно разделить на несколько стадий, но чаще выделяют две стадии:

- первую, в течение которой снижение напряжений в нагруженной детали происходит весьма быстро с резко уменьшающейся скоростью релаксации;
- вторую, в течение которой снижение напряжения происходит значительно медленнее с постепенно убывающей скоростью релаксации.

Длительность первой стадии релаксации в зависимости от рода материала, а также величины температуры и начального напряжения σ_0 меняется очень значительно.

Обычно принимают, что нарастание вязкопластической деформации в процессе релаксации подобно нарастанию ее при ползучести и поэтому скорость релаксации можно вычислять по скорости ползучести. Однако скорость релаксации принимать за скорость ползучести нельзя, т. к. эти два процесса по существу не вполне тождественны, механизм возникновения и нарастания вязкопластической деформации при релаксации несколько иной, чем при ползучести.

При релаксации уменьшение напряжений в детали вызывается нарастанием вязкопластической деформации за счет упругой деформации при неизменной длине образца, а при ползучести нарастание вязкопластической деформации происходит исключительно за счет удлинения образца. При этом общая деформация при ползучести значительно больше, чем при релаксации.

Экспериментальные кривые ползучести и релаксации являются исходным материалом для построения теорий ползучести, на основе которых рассчитывают напряженно-деформированное состояние элементов конструкций при сложном напряженном состоянии и напряжениях, переменных во времени.

6.2 Порядок проведения испытания на релаксацию напряжений

Порядок проведения испытаний на релаксацию напряжений, материал и размеры образца, методика обработки результатов испытания приводятся в соответствующих методических указаниях (находятся в лаборатории).

Контрольные вопросы

- 1 Что называется релаксацией напряжений?
- 2 Изменяется ли суммарная деформация при релаксации напряжений?
- 3 В каких координатах строится кривая релаксации?
- 4 Когда быстрее происходит падение напряжений: в начале опыта или в конце?
- 5 Что нужно делать с болтовыми соединениями конструкции, чтобы не нарушалась ее нормальная работа?
- 6 Как наблюдается явление релаксации во время проведения опыта?
- 7 Каким прибором определяется релаксация во время проведения опыта?

7 Лабораторная работа № 7. Опытное исследование концентрации напряжений при растяжении пластины с отверстием

Цель работы

1 Ознакомиться с явлением концентрации напряжений и методами исследования напряжений вблизи концентратора.

2 Построить график распределения напряжений по ширине пластины с малым отверстием, нагруженной осевой нагрузкой; определить значение теоретического коэффициента концентрации напряжений.

7.1 Теоретические сведения

Явление резкого увеличения напряжений вблизи особенностей поверхности называется концентрацией напряжений, а сами особенности поверхности – концентраторами напряжений [5–8].

Особенностями поверхности (концентраторами напряжений) являются:

- дефекты поверхности детали: трещины, острые углы, надрезы;
- дефекты материала: поры, шлаковые включения, трещины и т. д., в том числе и в сварных соединениях;
- изменения формы элемента конструкции: резкое или по радиусу изменение формы или размеров сечения, шпоночные пазы, резьба, сварные или заклепочные соединения, отверстия и т. п.

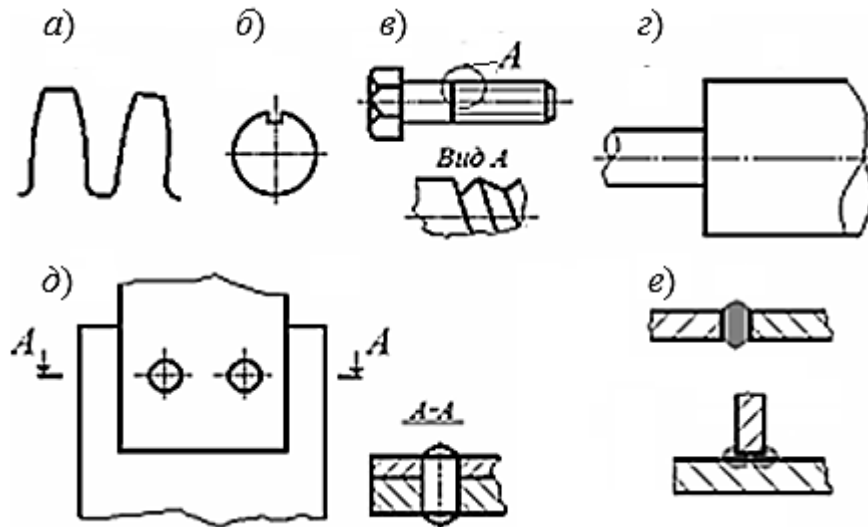
Концентрация напряжений возникает в малых областях, примыкающих к местам с резким изменением формы поверхности тела, размеров его сечения или с локализованной неоднородностью материала.

Теоретические и экспериментальные исследования показали, что равномерное распределение напряжений по площади поперечного сечения растянутого или сжатого стержня будет только в тех случаях, когда по длине стержня поперечное сечение постоянно или изменяется весьма плавно.

Расчеты конструкций при различных видах нагружения проводятся в предположении, что напряжения распределяются по сечению по соответствующим этим видам нагружения законам и не зависят от особенностей приложения нагрузки, наличия дефектов и т. п. (известный нам принцип Сен-Венана). Реальные конструкции всегда имеют зоны, в которых проявляется локальная концентрация напряжений. На рисунке 7.1 показаны примеры концентраторов напряжений.

Концентраторы напряжений подразделяются на локальные и размытые. Для локальных концентраторов характерно то, что объем области, занятой материалом с повышенными напряжениями пренебрежимо мал по сравнению с объемом тела. Отсюда следует, что общие размеры и форма всего нагруженного тела не будут существенно меняться в случае текучести материала в зоне

концентрации. В случае же размытой концентрации размеры и форма всего нагруженного тела меняются существенно.



a – корень зуба шестерни; *б* – шпоночный паз вала; *в* – резьба болта; *г* – резкий переход от меньшего диаметра к большему (уступ вала); *д* – заклепочное или болтовое соединение; *е* – сварное соединение

Рисунок 7.1 – Примеры концентраторов напряжений

Резкие изменения площади поперечного сечения из-за поперечных отверстий, канавок и надрезов приводят к неравномерному распределению напряжений и вызывают концентрацию напряжений. На это обстоятельство впервые указал немецкий механик Кирш.

С концентрацией напряжений приходится считаться при конструировании и расчете на прочность деталей машин. Следует по возможности избегать глубоких выточек, резких переходов сечений. Нужно также стремиться к тщательной обработке поверхностей. Все это, в свою очередь, поможет повысить предел прочности и срок эксплуатации деталей.

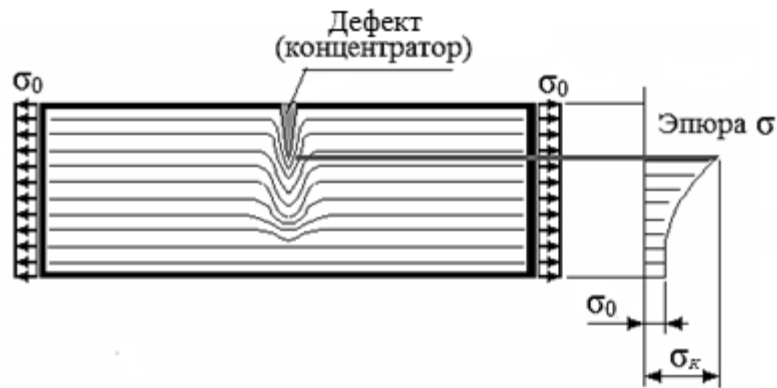
Факторы, вызывающие концентрацию напряжений (отверстие, надрез и т. п.), называются концентраторами напряжений.

Максимального значения напряжения достигают в непосредственной близости от концентратора и ограничиваются весьма небольшой частью площади поперечного сечения, т. е. имеют местный характер. Поэтому напряжения у мест концентрации называют местными.

Концентраторы напряжений значительно повышают локальные (местные) напряжения: процесс разрушения чаще всего начинается с них, что иногда приводит к аварийным разрушениям конструкций при их эксплуатации. Примерами таких разрушений являются:

- разрушения мостов, корпусов кораблей и самолетов;
- котлов, трубопроводов, атомных реакторов и т. д.

Эффект увеличения напряжений проиллюстрируем на примере растяжения пластины с острым дефектом (рисунок 7.2).



σ_0 – номинальное напряжение; σ_K – напряжение (местное) в вершине надреза

Рисунок 7.2 – Распределение напряжений в стержне: σ_0 – без концентратора; σ_K – с концентратором (надрезом)

«Силовые» линии растягивающих напряжений вблизи дефекта искривляются, огибая его. Чем ближе к вершине, тем сильнее эти линии искривляются. Иначе говоря, напряжения вблизи дефекта резко возрастают.

Отметим, что расчеты конструкций с дефектами при статическом нагружении дают незначительную ошибку.

При действии же, например, переменных напряжений или удара, как показывает опыт эксплуатации конструкций и эксперименты, положение усугубляется. Разрушение конструкций и образцов наблюдается при номинальных (рабочих) напряжениях, величина которых значительно меньше, чем значение допускаемых напряжений в случае статического нагружения. Очень важна при этом температура эксплуатации, особенно, если она низкая.

Концентрация напряжений исследуется теоретическими и экспериментальными методами.

Вблизи круглого отверстия напряжения определяются зависимостью $\sigma_K = 3\sigma_0$, а вблизи эллиптического отверстия – $\sigma_K = (1 + 2a/b)\sigma_0$.

Влияние концентратора при проведении расчетов оценивается теоретическим коэффициентом концентрации напряжений

$$\alpha_\sigma = \frac{\sigma_K}{\sigma_0}.$$

Этот коэффициент учитывает влияние только формы концентратора и применим только для упругой области нагружения, но не учитывает тот факт, что от отверстия или выточки отходят мельчайшие трещинки, которые невооруженным глазом могут быть не видны.

Теоретические (расчетные) методы базируются на методах теории упругости. В настоящее время – это метод конечных элементов (МКЭ), который реализуется в пакетах прикладных программ Cosmos, Ansys и др., например, на рисунке 7.3 показаны результаты расчета напряжений в среде Ansys.

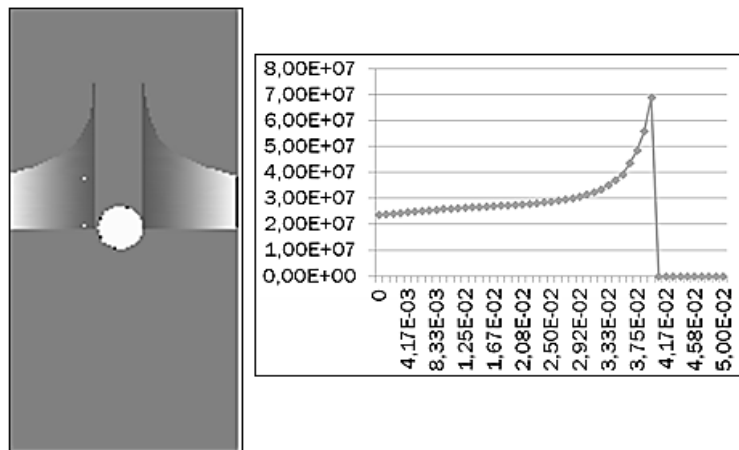


Рисунок 7.3 – Результаты расчета в среде Ansys напряжений в пластине с отверстием

Влияние концентратора оценивается также и коэффициентом чувствительности материала к концентрации напряжений q .

Используются также экспериментальные методы, когда концентрация напряжений для различных концентраторов исследуется на моделях. Это также методы, как фотоупругости, муаровых полос, лаковых покрытий, голографии, сеток, а также тензометрирования.

7.2 Порядок проведения исследования концентрации напряжений при растяжении пластины с отверстием

Порядок проведения исследования, материал и размеры образца, методика обработки результатов приводятся в соответствующих методических указаниях (находятся в лаборатории).

Контрольные вопросы

- 1 Дайте определение концентрации напряжений.
- 2 Как влияют особенности поверхности на распределение напряжений?
- 3 Чем отличается локальный концентратор от размытого концентратора?
- 4 По какой формуле определяется напряжение в пластине вблизи малого отверстия?
- 5 По какой формуле определяется теоретический коэффициент концентрации напряжений?
- 6 Перечислите экспериментальные методы исследования напряжений.

8 Лабораторная работа № 8. Определение вязкости разрушения материалов аддитивного синтеза при ударном нагружении

Цель работы

1 Изучить особенности сопротивления материалов действию динамических нагрузок.

2 Изучить требования ГОСТ 9454–78 *Металлы. Метод испытаний на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах нагружения*, ГОСТ 4647–2015 *Пластмассы. Метод определения ударной вязкости по Шарпи*, ГОСТ 19109–2017 *Пластмассы. Метод определения ударной вязкости по Изоду*.

3 Изучить методику исследования вязкости разрушения при статическом нагружении и определить критическое значение коэффициента интенсивности напряжений стального образца.

4 Ознакомиться с методами, приобрести навыки измерения ударной вязкости и исследовать ударную вязкость образцов материалов аддитивного синтеза методами Шарпи и Изода.

8.1 Теоретические сведения

В науке о прочности вязкость разрушения есть свойство, которое описывает способность материала, имеющего трещину, сопротивляться разрушению. Это свойство является одним из самых важных в практике проектирования и прогнозирования прочности конструкций.

Как известно, интенсивность распределения внутренних силовых факторов в сечении есть напряжение. Следовательно, вязкость разрушения – относительное повышение растягивающих напряжений в устье трещины при переходе ее от стабильной стадии роста к нестабильной.

Иначе говоря, вязкость разрушения является количественным выражением устойчивости материала конструкции к хрупкому разрушению. При большой вязкости разрушение соответствует механизму пластичного разрушения. При низкой вязкости – хрупкому механизму разрушения.

8.1.1 Вязкость разрушения при статическом нагружении. Основным условием при статических испытаниях является исключение возникновения ускорения при перемещении захватов. При передаче нагрузки от одного элемента конструкции к другому эти элементы не должны механически перемещаться. В элементах конструкции, если они движутся равномерно, скорость постоянна и ускорения отсутствуют.

Вязкость разрушения при статическом приложении нагрузки оценивается на образцах с трещиной по значениям критического коэффициента интенсивности напряжений (КИН) [8, 18]. Критическое значение КИН, т. е. K_{IC} , характе-

ризует опасное физическое состояние тела (местные напряжения) в вершине трещины и зависит от расположения трещины и условий нагружения тела.

Критический КИН K_C есть характеристика материала – способность его сопротивляться раскрытию трещины, т. е. характеризует трещиностойкость.

Критическое значение коэффициента интенсивности напряжений K_C устанавливается расчетом по величине критического напряжения σ_C .

Величина КИН зависит от размеров образца и расположения трещины по отношению к действующим нагрузкам (напряжениям). В таблице 8.1, для справки, приводятся значения вязкости разрушения при статическом нагружении образцов материалов с трещиной.

Задаются форма и размеры образца, материал и расположение трещины по отношению к действующим нагрузкам (напряжениям). По этим данным выполняется расчет КИН, характеризующего вязкость разрушения при статическом нагружении.

Таблица 8.1 – Вязкость разрушения материалов при статическом нагружении

Тип материала	Материал	K_{IC} , МПа·м ²
Металл	Алюминий	14...28
	Алюминиевый сплав (7075)	20...35
	Инконель 718	73...87
	Мартенситностареющая сталь (марка 200)	175
	Стальной сплав (4340)	50
	Титановый сплав	84...107
Керамика	Оксид алюминия	3...5
	Карбид кремния	3...5
	Натриево-известковое стекло	0,7...0,8
Полимер	Полиметилметакрилат	0,7...1,60
	Полистирол	0,7...1,1

8.1.2 Вязкость разрушения при динамическом нагружении. Чаще всего исследование выполняется при ударном приложении нагрузки к образцу [5–8].

Под ударом понимается соприкосновение двух движущихся тел, в результате которого их скорости изменяются за очень короткий период времени. Время удара исчисляется тысячными, а иногда и миллионными долями секунды.

Скорость ударяющего тела практически мгновенно изменяется (уменьшается зачастую до нуля), поэтому на тело, воспринимающее удар (ударяемое тело), передаются очень большие ускорения.

Эти ускорения остаются неизвестными, т. к. точное время удара мы не знаем.

При ударе происходит быстрое превращение одного вида энергии в другой: кинетическая энергия ударяющего тела превращается в потенциальную энергию деформации ударяемого тела.

Пластические свойства, как известно, характеризуются площадью под кривой – под диаграммой деформирования (рисунок 8.1). При ударе нагрузки бо-

лее «короткие» и площадь под кривой будет меньше. Следовательно, при ударе материал становится как бы более хрупким.

Решение инженерных задач расчета при ударе обычно строится на основе приближенной теории упругого удара.

Материал ударяемой детали подчиняется закону Гука в определенном интервале ударных нагрузок. Это обстоятельство подтверждается опытами, т. е. $\sigma_d = \varepsilon_d E$.



Рисунок 8.2 – Диаграммы растяжения при статическом нагружении и при ударе

8.1.3 Динамический коэффициент при ударе. Методика инженерного расчета на прочность при ударе без учета массы упругой системы дает следующую расчетную зависимость для определения динамического коэффициента:

$$K_d = 1 + \sqrt{1 + \frac{2H}{\Delta_{ст}}},$$

где $\Delta_{ст}$ – перемещение сечения бруса, в котором статически приложена внешняя нагрузка.

8.2 Экспериментальное определение ударной вязкости

8.2.1 Теоретические сведения. Механические свойства материалов существенно зависят от скорости деформирования изделия в процессе нагружения. Статические испытания материалов не всегда воспроизводят реальные условия нагружения деталей. В ряде случаев работа деталей в машинах и механизмах связана с приложением ударных нагрузок, которые вызывают соответствующие напряжения, называемые динамическими. При этом предел текучести может повышаться на 20 %...70 %, предел прочности на 10 %...30 % по сравнению со статическим растяжением, а пластичность убывает. Даже при сравнительно невысоких скоростях нагружения у пластичных материалов наблюдается склонность к хрупкому разрушению.

При ударе особенно существенно сказывается влияние на прочность материала местных напряжений или так называемых концентраторов напряжений.

В этом случае потенциальная энергия деформации не успевает распространиться по всему объему тела. Она концентрируется в области местных дефектов (надрезов, пор, трещин, резкого изменения сечения и т. д.). В связи с

особенностями поведения материала при ударном нагружении необходимо, наряду с механическими испытаниями, проводить испытания на удар. Например, испытания материалов на ударную вязкость.

Ударная вязкость – механическая характеристика материала, она определяется отношением работы внешних сил, затраченной на разрушение образца к площади поперечного сечения в месте надреза и характеризует способность материала сопротивляться хрупкому разрушению (трещиностойкость).

Испытания на ударную вязкость актуальны для сварных соединений и конструкций, работающих при низких температурах.

Благодаря простоте выполнения и точности результатов наиболее распространенными являются испытания динамической нагрузкой на изгиб. При этих испытаниях образец устанавливают на две опоры и посередине наносят удар.

8.2.2 Испытательное оборудование и образцы. Требования к оборудованию и образцам для испытаний на ударную вязкость изложены ГОСТ 9454–78 *Металлы. Метод испытаний на ударный изгиб*, ГОСТ 4647–2015 *Пластмассы. Метод определения ударной вязкости по Шарпи*, ГОСТ 19109–84 *Пластмассы. Метод определения ударной вязкости по Изоду*.

8.2.3 Маятниковые копры. Испытания проводятся на специальном оборудовании – копрах. На рисунке 8.3 показаны маятниковые копры для испытаний образцов на ударную вязкость *JB-300B* и *Kason XJ-50Z*.

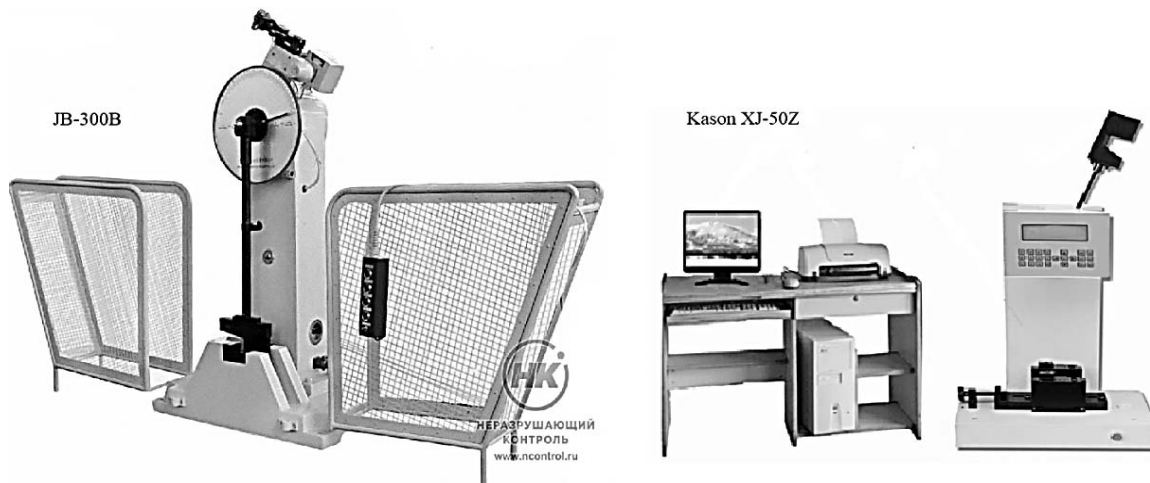


Рисунок 8.3 – Маятниковые копры

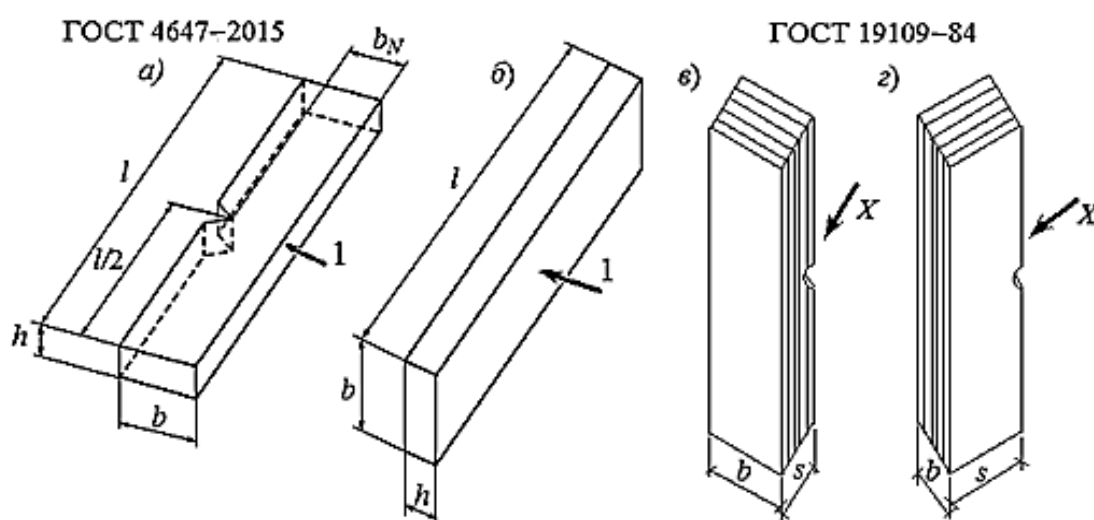
Маятниковый копер *JB-300B* – это полуавтоматическое испытательное устройство для определения ударной вязкости образцов из металлов методом единичного динамического нагружения. Поставляется со съёмными молотами на 150 и 300 Дж. Имеет круговую шкалу для считывания результатов тестирования.

Маятниковый копер с компьютерным управлением *Kason XJ-50Z* используется для испытания на ударную вязкость пластмасс, изделий из стекловолокна, армированных композитов, керамики, электроизоляционного материала и других неметаллических материалов.

8.2.4 Образцы для испытаний на ударную вязкость. Образцы для испытаний на ударную вязкость имеют обычно квадратное или прямоугольное сечение. В середине образца выполняется надрез специальной формы – с разными радиусами скругления дна надреза, в том числе и при радиусе $r \rightarrow 0$. Форма и размеры образца регламентируются соответствующими стандартами.

На рисунке 8.4 для примера показаны некоторые из образцов для испытаний по Шарпи и Изоду.

Специальный надрез облегчает хрупкое разрушение материала. Удар наносится строго против разреза с противоположной стороны образца. Испытания проводятся на маятниковых копрах *JB-300B* и *Kason XJ-50Z*. Методика испытаний применялась в лабораторном практикуме по дисциплине «Механика материалов и конструкций».



1, X – направления удара; испытание на удар по Шарпи: а – в ребро; б – плашмя; испытание на удар по Изоду: в – перпендикулярно слоям; г – параллельно слоям

Рисунок 8.4 – Общий вид некоторых образцов для испытаний на удар по Шарпи и по Изоду

8.3 Порядок проведения исследования ударной вязкости

Порядок проведения исследования, материал и размеры образца, методика обработки результатов приводятся в соответствующих методических указаниях (находятся в лаборатории).

Контрольные вопросы

- 1 Дайте определение коэффициенту интенсивности напряжений. Укажите его размерность.
- 2 Запишите формулу для определения коэффициента интенсивности напряжений.
- 3 Что такое критическое напряжение σ_c и как оно определяется?

- 4 Как определяются вязкость разрушения и критический коэффициент интенсивности напряжений?
- 5 Как зависит пластичность материала от скорости деформирования образца?
- 6 Опишите вид образца, на котором производятся испытания на ударную вязкость.
- 7 С какой целью выполняется надрез на образце?
- 8 Как зависит ударная вязкость материала при изменении температуры?

Список литературы

- 1 Сопротивление материалов. Лабораторный практикум: учеб. пособие / под ред. Ю. П. Подлеснова. – Брянск: БГТУ, 2010. – 119 с.
- 2 **Антипенко, Г. Л.** Методика и техника инженерного эксперимента: учеб. пособие / Г. Л. Антипенко; под общ. ред. В. П. Березиенко, В. Г. Лупачева. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2008. – 278 с.
- 3 **Цурпал, И. А.** Сопротивление материалов. Лабораторные работы / И. А. Цурпал, Н. П. Барабан, В. М. Швайко. – Киев: Вища шк., 1988. – 245 с.
- 4 **Афанасьев, А. М.** Лабораторный практикум по сопротивлению материалов / А. М. Афанасьев, В. А. Марьин. – М.: Физматгиз, 1975. – 287 с.
- 5 **Кузменко, И. М.** Механика материалов: учеб. пособие: в 2 ч. / И. М. Кузменко. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2020. – Ч. 1. – 289 с.: ил.
- 6 **Кузменко, И. М.** Механика материалов: учеб. пособие: в 2 ч. / И. М. Кузменко. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2020. – Ч. 2. – 281 с.: ил.
- 7 **Валишвили, Н. В.** Сопротивление материалов и конструкций: учебник / Н. В. Валишвили, С. С. Гаврюшин. – М.: Юрайт, 2022. – 429 с.
- 8 **Кузменко, И. М.** Механика разрушения: учеб. пособие / И. М. Кузменко. – Могилев: МГТУ, 2001. – 174 с.
- 9 **Хасанов, О. Л.** Сопротивление материалов. Твердость и трещиностойкость наноструктурных керамик: учеб. пособие / О. Л. Хасанов. – М.: Юрайт, 2016. – 150 с.
- 10 **Ставров, В. П.** Механика композиционных материалов: учебник / В. П. Ставров. – Минск: БГТУ, 2008. – 262 с.
- 11 **Ривлин, Ю. И.** Металлы и их заменители: справочник / Ю. И. Ривлин, М. А. Коротков, В. И. Чернобыльский. – М.: Металлургия, 1979. – 440 с.
- 12 **Бабичев, А. И.** Физические величины: справочник / А. И. Бабичев; под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
- 13 Сопротивление материалов: учебник / под ред. Г. С. Писаренко. – 5-е изд., перераб. и доп. – Киев: Вища шк., 1986. – 775 с.
- 14 Справочник металлиста: в 2 т / под общ. ред. Н. С. Ачеркана. – М.: Машиностроение, 1965. – Т. 2. – 236 с.
- 15 **Конькова, А. А.** Руководство к лабораторным работам по сопротивлению материалов / А. А. Конькова, Н. А. Луговская, А. К. Чертков. – Петрозаводск: Петрозавод. гос. ун-т им. О. В. Куусинена, 1975. – 260 с.

16 Определение реологических и физико-механических свойств полимерных материалов: метод. указания к лабораторным работам / сост. Н. М. Мухин, В. Г. Бурындин. – Саратов: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2011. – 32 с.

17 **Осипок, Т. В.** Оценка анизотропии механических свойств листового проката из углеродистой стали / Т. В. Осипок, С. А. Зайдес // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2020. – Т. 24, № 5. – С. 1007–1018.

18 **Фудзии, Т.** Механика разрушения композиционных материалов: пер. с яп. / Т. Фудзии, М. Дзако. – М.: Мир, 1982. – 232 с.