

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Технологии металлов»

МЕХАНИКА МАТЕРИАЛОВ АДДИТИВНОГО СИНТЕЗА

*Методические рекомендации к лабораторным работам
для студентов специальности
1-36 07 02 «Производство изделий на основе
трехмерных технологий» дневной и заочной форм обучения*

Часть 1



Могилев 2021

УДК 539.3
ББК 30.1
М54

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Технологии металлов» «31» августа 2021 г.,
протокол № 1

Составитель И. М. Кузменко

Рецензент канд. техн. наук, доц. А. П. Прудников

Приводятся краткие теоретические сведения, описываются методики выполнения и обработки результатов экспериментов при проведении лабораторных работ студентами специальности 1-36 07 02 «Производство изделий на основе трехмерных технологий» дневной и заочной форм обучения в четвертом семестре.

Учебно-методическое издание

МЕХАНИКА МАТЕРИАЛОВ АДДИТИВНОГО СИНТЕЗА

Часть 1

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 36 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, 2021

Содержание

Введение.....	4
1 Лабораторная работа № 1. Испытательное оборудование и измерительные приборы.....	5
2 Лабораторная работа № 2. Определение механических характеристик материалов аддитивного синтеза при испытании на растяжение.....	18
3 Лабораторная работа № 3. Определение механических характеристик материалов аддитивного синтеза при испытании на сжатие.....	28
4 Лабораторная работа № 4. Определение механических характеристик материалов аддитивного синтеза при испытании на статический изгиб.....	35
5 Лабораторная работа № 5. Определение модуля упругости первого рода материалов аддитивного синтеза.....	41
Список литературы.....	48

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 данными обстоятельствами при проектировании изделия, его расчете и технологии изготовления необходимо знать соответствующие характеристики свойств материала изделия и его компонентов [1–11]. Эти свойства определяются на основе *стандартных испытаний* (растяжение, сжатие, сдвиг, изгиб), а также специальных испытаний.

В результате получают необходимые сведения о характеристиках материалов (*изотропных и анизотропных*):

- прочность, жесткость (модули упругости) в разных направлениях;
- показатели ударной вязкости;
- трещиностойкость (вязкость разрушения) при статическом и динамическом нагружении;
- коэффициент линейного теплового расширения в разных направлениях;
- реологические свойства (теплопроводность, электропроводность, коэффициент трения).

Также при необходимости изучаются и другие *специальные свойства материалов*.

При изучении дисциплины «Механика материалов аддитивного синтеза» студенты овладеют методами экспериментального определения свойств материалов и особенностей их структуры и механического поведения при формообразовании и эксплуатации изделий.

Учебной программой дисциплины «Механика материалов аддитивного синтеза» предусмотрено выполнение лабораторных работ, в которых определяются характеристики таких материалов при испытании их при различных видах нагружения. Результаты испытаний позволяют дать оценку возможности использования полимерных материалов и композитов в конкретных условиях эксплуатации.

1 Лабораторная работа № 1. Испытательное оборудование и измерительные приборы

1.1 Цель работы

1 Ознакомиться с испытательным оборудованием и приборами для измерения деформаций и напряжений испытуемых образцов.

2 Изучить технику безопасности при выполнении лабораторных работ.

1.2 Теоретические сведения

Механические характеристики материалов – это числовые значения, характеризующие их прочность, жесткость, пластичность, упругость, вязкость и другие свойства. Они определяются экспериментально, на основе результатов испытаний образцов.

На каждый вид испытаний разработаны соответствующие Стандарты, в которых регламентированы все этапы проведения испытаний: вид, размеры, требования к механической обработке образцов, требования к испытательным машинам, методики проведения и обработки результатов испытаний.

Наиболее важными и чаще всего используемыми в расчетах на прочность и жесткость являются механические характеристики материалов, которые определяются по результатам испытаний образцов на растяжение и сжатие.

Испытания проводятся на испытательных машинах силового и кинематического типов, которые снабжены устройствами, показывающими нагрузку, которая передается на образец – так называемые *силоизмерительные устройства*. Эти машины снабжаются также устройствами, с помощью которых записывается диаграмма деформирования – вычерчивается *график «удлинение образца – нагрузка на образце»*.

1.2.1 Испытательное оборудование.

Машины для статических испытаний материалов условно делят на два класса:

1) машины *кинематического типа*, в которых фактически задаваемой и контролируемой величиной является *взаимное перемещение зажимных головок* машины. В этих машинах перемещение различных частей (от моторов или вручную) осуществляется с помощью рычажных, червячных, винтовых и шестеренчатых передач;

2) машины *силового типа*, в которых регулируемые параметрами являются *усилия*, передаваемые образцу через зажимные устройства. В этих машинах перемещение различных частей (от моторов или вручную) осуществляется, как правило, с помощью гидравлических или пневматических устройств.

Лаборатории кафедры оснащены универсальными машинами и специальными лабораторными установками, позволяющими проводить определение

механических характеристик материалов, а также изучать сопротивление материалов и образцов при различных видах нагружения:

1) испытательные машины производства «ИПО Точмашприбор» (Россия, г. Армавир): ПГ-100 (1961 г. вып.); ГРМ-1 (1963); УММ-10 (1964); МУП-20 (1968);

2) лабораторные установки:

– собственного производства;

– разработанные и изготовленные на предприятии «НТП «Центр» (г. Могилев);

3) испытательные машины WAW-300C и Kason WDW-1 (рисунок 1.1).

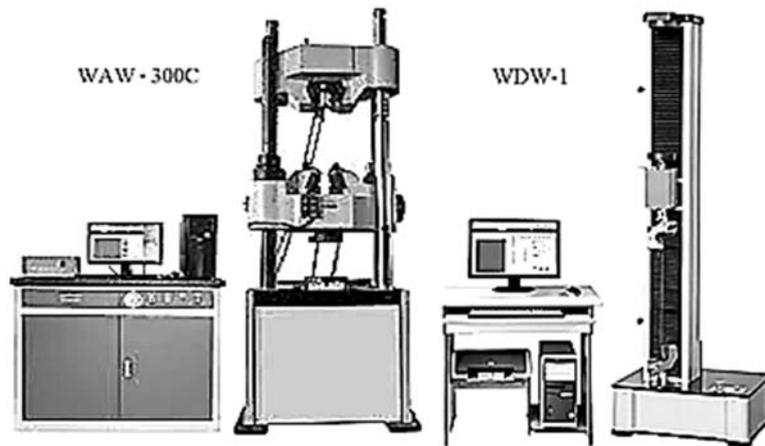


Рисунок 1.1 – Испытательные машины

Машина WAW-300C предназначена для проведения статических испытаний на растяжение, сжатие и изгиб металлических материалов, стальной арматуры, образцов газо- и нефтепроводных труб, стальных канатов и кабелей, бетона, древесины и любых других прочных материалов.

Испытания широкого диапазона материалов (металла, резины, пластмассы, пружин, текстиля и др.) на растяжение, сжатие, изгиб, разрыв и т. д. выполняются на машине Kason WDW-1 (см. рисунок 1.1). Ее технические характеристики приведены в таблице 2.1 (см. лабораторную работу № 2);

4) маятниковые копры (рисунок 1.2) для испытаний образцов на ударную вязкость: JB-300 В и Kason XJ-50Z.

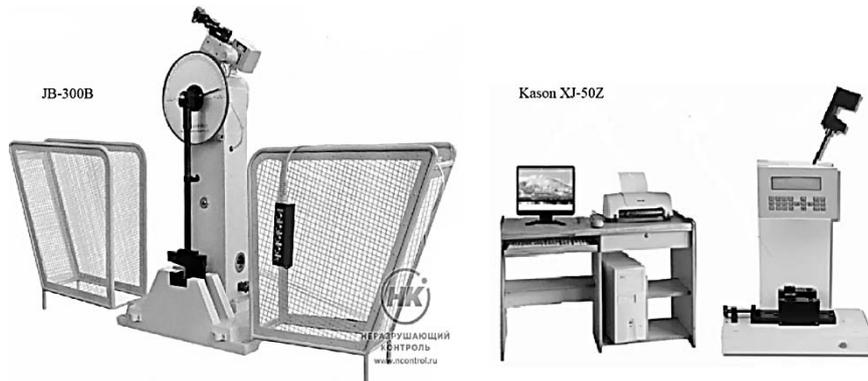


Рисунок 1.2 – Маятниковые копры

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.

Результаты испытаний при определении механических характеристик получают в виде диаграмм растяжения (а также сжатия, кручения, изгиба). На рисунке 1.3 в качестве примера приведен вид диаграммы испытания образца на растяжение на машине WAW-300C.

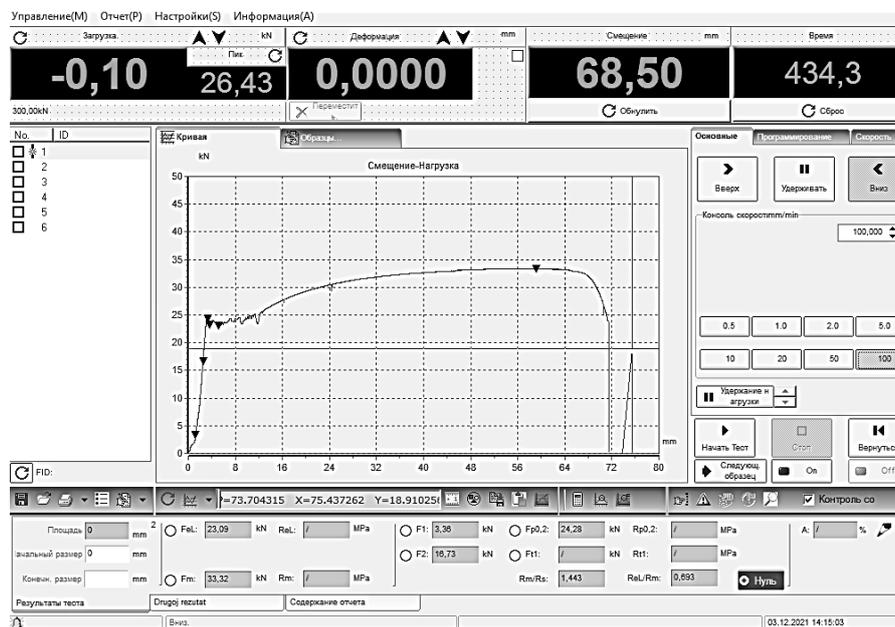


Рисунок 1.3 – Вид диаграммы испытания образца на машине WAW-300C

1.2.2 Методы исследования напряжений и деформаций.

Истинные значения напряжений и деформаций, возникающих в образцах, деталях и узлах конструкций, определяются их формой, механическими характеристиками материалов и особенностями их конструктивного и технологического выполнения.

Для определения истинных значений напряжений и деформаций используются различные экспериментальные методы.

Поляризационно-оптический метод (метод фотоупругости). Установить характер распределения напряжений и их величины теоретическим путем или экспериментально в деталях сложной конфигурации затруднительно. В этом случае используется один из методов теории упругости – поляризационно-оптический метод исследования напряжений.

Сущность метода заключается в том, что исследуемая деталь заменяется геометрически подобной моделью, изготовленной из оптически чувствительного

материала (органическое стекло, искусственные смолы и т. д.), обладающего свойством двойного лучепреломления. Через нагруженную модель пропускают поляризованный свет. При этом на экране установки можно наблюдать изображение модели с интерференционной окраской, отвечающей характеру распределения напряжений, их величине в модели и, соответственно, в реальной детали. Особенно полезен оптический метод при исследовании концентрации напряжений в местах резкого изменения формы детали.

Метод лаковых покрытий. Метод рационально применять для выяснения общей картины распределения напряжений и деформаций, а также для определения наиболее напряженных участков на поверхностях деталей сложной конфигурации.

Сущность метода такова: на чистую поверхность исследуемого объекта наносят тонкий слой специального лака. После его высыхания образуется прочная пленка. При деформировании на покрытии образуются трещины, последовательность возникновения которых характеризует напряженное состояние поверхности объекта.

Количественная оценка напряжений этим методом весьма приближительна.

Аналоговые методы. Методы основаны на аналогии между распределением напряжений в упругой детали и некоторыми другими физическими и электрическими явлениями.

Аналогия позволяет наглядно представить себе закономерности, существующие в детали.

1 *Метод пленочной (мембранной) аналогии.* Известно, что задача о кручении бруса описывается таким же дифференциальным уравнением, как и задача о равновесии пленки, натянутой на плоский контур, конфигурация которого тождественна форме поперечного сечения изучаемого бруса.

Методом пленочной аналогии можно решать задачи о кручении стержней сложного профиля не только качественно, но и количественно. Для этой цели в настоящее время создано большое количество разнообразных по конструкции экспериментальных установок и приборов.

2 *Электрическая аналогия.* При кручении круглых брусьев переменного диаметра имеет место электрическая аналогия.

По распределению электрических потенциалов в модели вычисляют распределение напряжений в бруссе.

3 *Гидродинамическая аналогия.* Сущность метода заключается в установлении математической тождественности между задачами теории упругости или сопротивления материалов и задачами гидродинамики.

Например, аналогия между задачей о кручении стержней произвольного поперечного сечения и задачей о вращательном движении жидкости, заключенной в трубу такого же контура, что и сечение скручиваемого стержня.

4 *Метод муаровых полос.* Муаровый эффект возникает при наложении одной на другую достаточно мелких сеток и состоит в образовании картины чередующихся темных и светлых полос. Эта картина носит название муара. На исследуемый объект наносят достаточно мелкую сетку (состоящую из прямых

параллельных линий). При его деформации сетка искажается, т. е. расстояния между линиями изменяются, а сами они искривляются.

При наложении эталонной сетки на деформированную сетку возникает картина муаровых полос (рисунок 1.4). Образующиеся муаровые полосы являются линиями уровня некоторых геометрических величин (перемещений, углов наклона, прогибов, кривизны и т. п.).

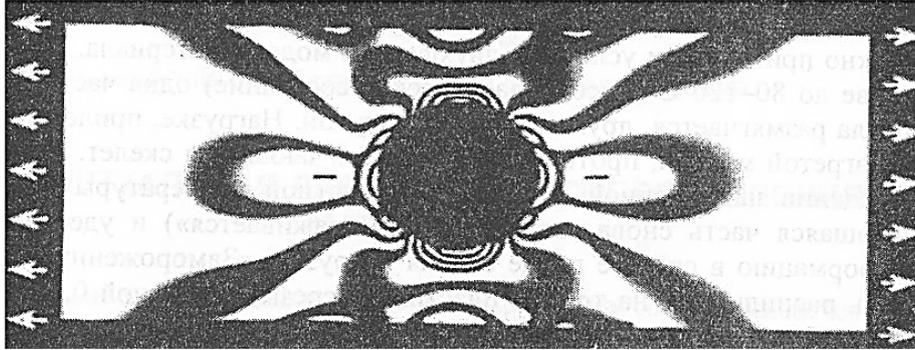


Рисунок 1.4 – Картина муаровых полос

Метод обеспечивает наглядную картину деформации по всей исследуемой поверхности. Вследствие своего чисто геометрического характера он позволяет исследовать деформации независимо от их физической природы.

5 Метод делительных сеток. Сущность метода заключается в следующем: на поверхность исследуемого объекта наносят (царапаньем, травлением или накаткой) сетку ячеек определенной формы и известных размеров. По изменению формы ячеек, связанному с деформированием образца, судят о характере и распределении пластической деформации. Измерением ячеек сетки после деформирования получают количественные характеристики деформированного состояния. Экспериментальным путем могут быть определены как величины главных напряжений, так и их направления.

Наиболее часто метод делительных сеток применяют при исследовании распределения упругих деформаций на моделях из низко модульных материалов (резина), а также при изучении процессов обработки материалов давлением, связанных с образованием больших пластических деформаций.

Электрический метод измерения деформаций (тензометрический метод). Позволяет регистрировать не только статические, но и динамические деформации, и передавать измеренные данные на расстояние.

Малогабаритный датчик сопротивления можно устанавливать в труднодоступных местах, на движущихся деталях машин. Кроме того, появляется возможность регистрации показаний ряда датчиков, установленных в разных точках детали.

Наибольшее распространение в экспериментальных исследованиях получил проволочный датчик омического сопротивления – **тензорезистор** (от англ. *tensos* – сила и *resistor* – сопротивление).

В основе этого метода лежит зависимость омического сопротивления материала (специального сплава: *константана* или *манганина*) от геометрических размеров элемента, изготовленного из этого материала.

Константан – сплав меди (60 %) и никеля (40 %), *манганин* – сплав меди (84 %), никеля (4 %) и марганца (12 %).

Электрические тензометры сопротивления обладают достаточной линейной зависимостью электросопротивления от степени деформации, высокой тензочувствительностью, малой длиной контакта с деталью или образцом и малой массой.

Чувствительным элементом датчика (рисунок 1.5) является тонкая константановая или манганиновая проволока 2, зигзагообразно уложенная между полосками тонкой бумаги или фольги 1, 3 и приклеенная к ней. 4 – выводные проводники. Длина зигзагообразного участка S называется базой тензорезистора.

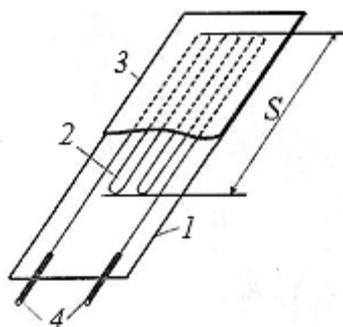


Рисунок 1.5 – Схема проволочного тензорезистора

Чаще всего датчики изготавливаются с базой 30; 20; 15; 10, 5 и 2,5 мм.

При растяжении и сжатии относительное изменение омического сопротивления тензорезистора ($\Delta R/R$) прямо пропорционально его относительной деформации ($\Delta l/l$), т. е.

$$\frac{\Delta R}{R} = k \frac{\Delta l}{l} = k\varepsilon,$$

где k – коэффициент тензочувствительности тензорезистора, является постоянной безразмерной величиной, которая обычно равна 1,8 ... 2,3.

В исследованиях применяются датчики омического сопротивления различной конструкции (рисунок 1.6).

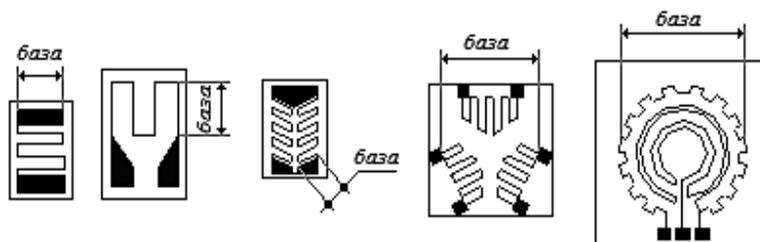


Рисунок 1.6 – Некоторые конструкции тензорезисторов

При растяжении (сжатии) электрического проводника изменяется его сопротивление, которое прямо пропорционально деформации. Изменение сопротивления наклеенного датчика характеризует деформацию детали. Сопротивление наклеенного датчика при упругих деформациях изменяется на малую величину. Малое изменение сопротивления датчика преобразуется в изменение электрического напряжения с помощью мостика Уинстона.

Тензорезисторы используются также для измерения других механических величин (сил, ускорений, перемещений, давлений), однозначно связанных с деформацией.

1.2.3 Приборы для измерения деформаций и напряжений.

Механические тензометры.

Тензометр Гуггенбергера (рисунок 1.7, а) – наиболее распространенный среди рычажных тензометров. Измерение деформаций осуществляется следующим образом: тензометр с помощью трубки крепится к образцу так, чтобы он ножкой 2 и призмой 1 вдавливался в поверхность этого образца. При растяжении образца подвижная призма 1 смещается и расстояние l между опорами прибора (база прибора) изменяется на величину Δl .

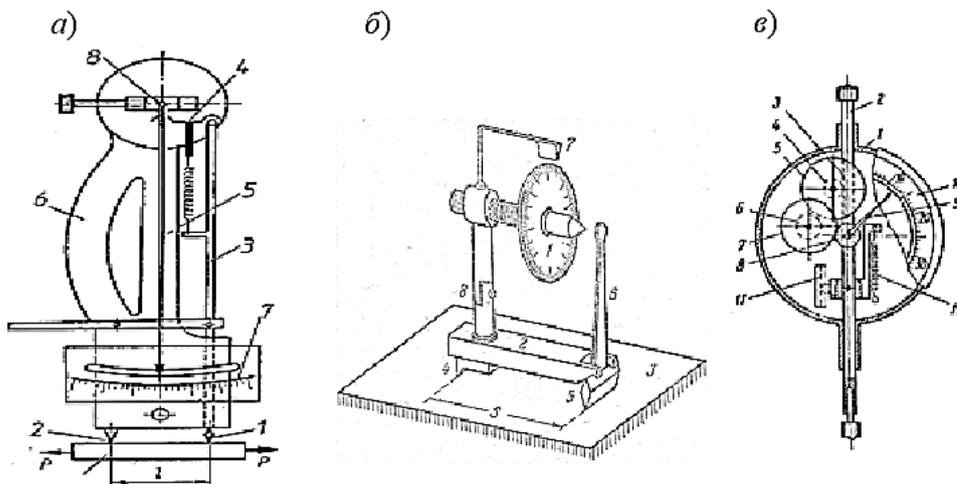


Рисунок 1.7 – Механические тензометры

За счет рычага 3 это смещение увеличивается в k раз и по шкале прибора невооруженным глазом будет видно отклонение ΔA стрелки 5. Для более точного отсчета стрелка прибора совмещается с ее отражением в зеркале шкалы. Цена деления шкалы 1 мм.

Коэффициент увеличения прибора $k = 1000$.

База прибора $l = 20$ мм. Абсолютная деформация образца $\Delta l = \Delta A/k$.

Тензометр Аистова (рисунок 1.7, б). В тензометре Аистова, в отличие от тензометра Гуггенбергера, вместо стрелки используется микрометрический винт с лимбом 1. Отношение высоты призмы 5 к длине рычага 6 равно 1:5 (замеряемое удлинение увеличивается в 5 раз). База тензометра s имеет максимальное значение 60 мм. Цена деления шкалы равна 0,001 мм.

Индикаторы часового типа (рисунок 1.7, в) используются в лабораторных исследованиях для непосредственного измерения линейных деформаций образцов.

Основанием прибора является корпус 1, внутри которого в диаметральной плоскости может перемещаться мерительный стержень 2. На мерительном стержне нарезаны зубья, образующие зубчатую рейку 3. При поступательном движении мерительного стержня зубья рейки приводят во вращение систему зубчатых колес (4–8). На оси последнего зубчатого колеса 8 укреплен указательная стрелка 9, передвигающаяся по круговому циферблату 10. Передаточные числа зубчатой рейки и системы зубчатых колес подобраны таким образом, что при перемещении мерительного стержня на 0,01 мм стрелка передвигается на одно деление кругового циферблата.

Круговой циферблат разбит на 100 делений. Следовательно, при перемещении мерительного стержня на 1 мм указательная стрелка описывает полный круг.

На оси зубчатых колес 4 и 5 укреплен малая стрелка (на рисунке 1.7, в не показана). Один оборот малая стрелка совершает при перемещении мерительного стержня на 10 мм. Циферблат малой стрелки разбит на 10 делений (цена одного деления 1 мм).

Таким образом, стрелочный индикатор измеряет линейные перемещения до 10 мм с точностью 0,01 мм.

Тензометрические приборы.

Прибор, измеряющий деформацию детали электрическим методом, называется *электрическим тензометром*. Он состоит из воспринимающего устройства (датчика), усилителя и регистрирующего прибора.

Датчиками являются так называемые тензорезисторы, которые наклеиваются на поверхность образца в направлении измеряемой деформации и деформируются вместе с ним. При этом изменение сопротивления тензорезистора может быть зарегистрировано с помощью *моста сопротивлений* как изменение электрического тока.

Мост сопротивления (*мост Уинстона*) содержит четыре сопротивления: R_1, R_2, R_3, R_4 , соединенных в виде квадрата (рисунок 1.8).

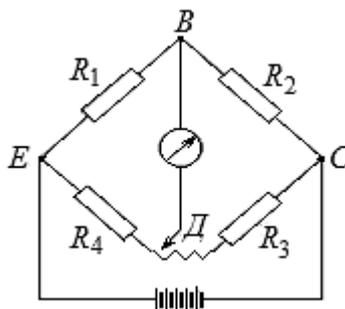


Рисунок 1.8 – Мост сопротивлений (мост Уинстона)

Диагональ моста BD является измерительной, в нее включен чувствительный гальванометр. Диагональ EC является питающей, т. к. к ней подводится напряжение от батареи или выпрямителя.

Сопротивление R_1 представляет собой рабочий тензорезистор, наклеенный на исследуемый образец. Сопротивление R_2 равно по величине R_1 и является компенсационным тензорезистором, наклеенным на такой же материал, что и R_1 , и находящимся рядом с рабочим датчиком, т. е. при таких же температурных условиях.

Сопротивления R_1 и R_2 образуют внешний полумост, благодаря которому компенсируются температурные деформации, которые могут возникнуть в рабочем датчике и повлиять на точность измерения. Одинаковые по величине сопротивления R_3 и R_4 образуют внутренний полумост, смонтированный внутри измерительного прибора.

Переменное сопротивление в точке D называется реохордом и служит для балансировки моста. В этом случае до приложения нагрузки ток в измерительной диагонали BD будет отсутствовать. При деформации образца сопротивление тензорезистора R_1 изменится на некоторую величину ΔR , которая будет зафиксирована.

Для определения действительных величин деформаций производится *тарировка* измерительного прибора, т. е. определяется цена одного деления шкалы или цена одной единицы показаний на табло прибора. Для этого производят одновременное измерение деформации в том же месте другими средствами, например, рычажным тензомером.

Для измерения деформации образца во время проведения испытаний применяется *экстензометр* (*extensometer*). Экстензометры позволяют напрямую измерять деформацию образца во время приложения нагрузки. Различают два основных типа экстензометров: контактные и бесконтактные (рисунок 1.9).

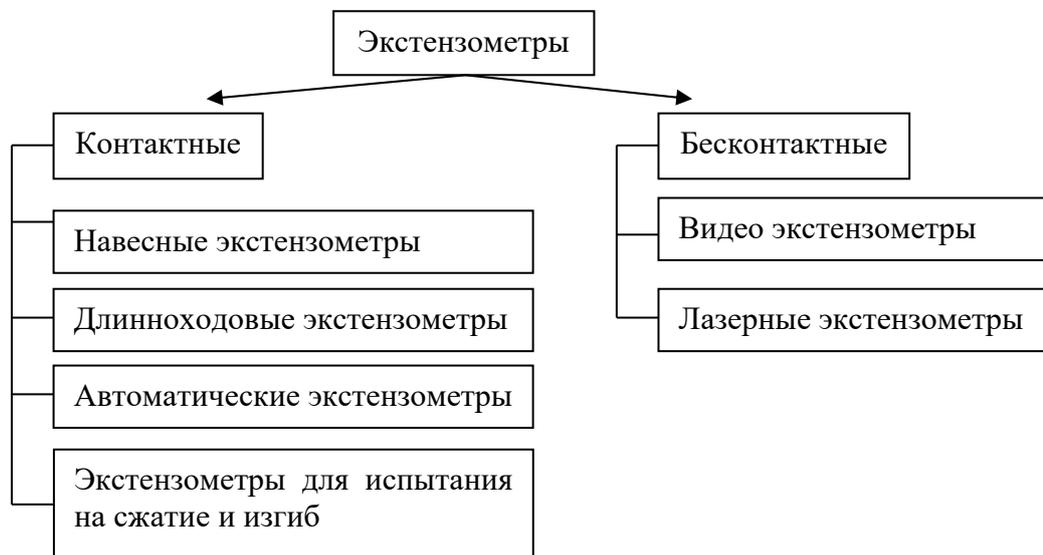


Рисунок 1.9 – Классификация экстензометров

Контактные экстензометры различных конструкций (навесные) приведены на рисунке 1.10.

Длинноходовой экстензометр УИД-1000 (см. рисунок 1.10, *a*) используется для измерения растяжения материалов с большой деформацией, например, резины, полимеров и пленок.

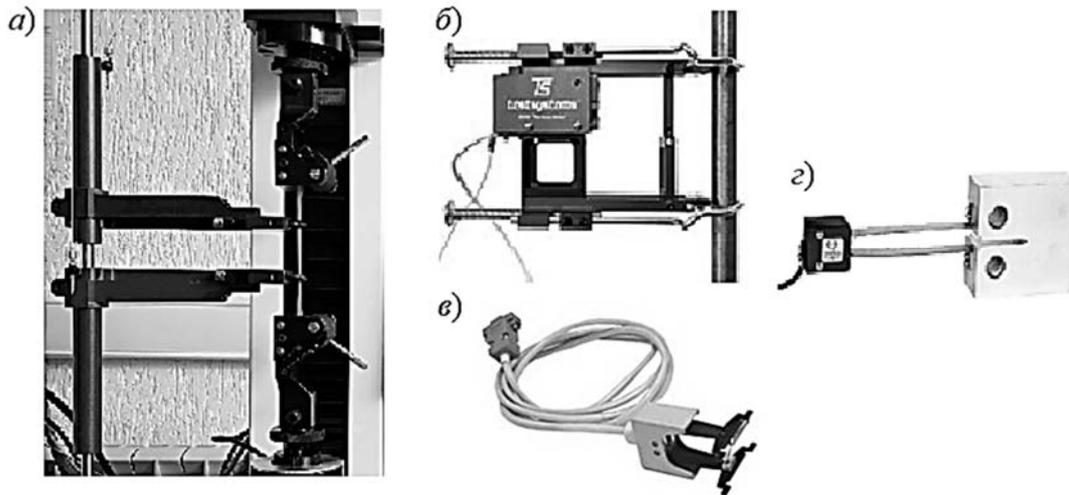


Рисунок 1.10 – Некоторые конструкции контактных экстензометров

Контактные навесные экстензометры (см. рисунок 1.10, б) предназначены для испытаний образцов из различных материалов, включая металлы, пластмассы, композиты и керамику. Экстензометры помещаются на образец и поддерживаются им.

Тензометрические датчики деформации ДДТ (см. рисунок 1.10, в) предназначены для измерения деформации образцов материалов при испытании на растяжение/сжатие.

Клиповые датчики, например, модель 3541 (см. рисунок 1.10, г). Модель является тензорезисторным устройством, которое совместимо с любой электроникой, разработанной для датчиков на основе тензорезисторов. Клиповые датчики используются для различных испытаний по механике разрушения, включая растяжение компактных, секторных, дисковых, изгибных образцов или образцов других геометрий в соответствии со стандартными испытательными методами. Такие датчики могут быть установлены непосредственно на образец, когда острые опорные кромки входят в конструкцию испытываемого образца.

Выходные сигналы датчиков обрабатываются при помощи приборов, имеющих общее название: *тензометрические приборы или станции*. В лаборатории кафедры используются:

1) *измеритель деформаций цифровой ИДЦ-1* (рисунок 1.11). Так как ИДЦ-1 не имеет устройства для балансировки мостовой схемы, то при подключении даже ненагруженного тензорезистора на табло появляется число, которое следует считать нулевой отметкой. Разность между показаниями прибора – последующим Δn и предыдущим $\Delta n'$ значениями, является величиной, пропорциональной измеряемой деформации:

$$\varepsilon = \Delta n \cdot m; \quad \varepsilon' = \Delta n' \cdot m ,$$

где m – цена одного деления или тарировочный коэффициент ИДЦ-1;

2) *тензостанция TS32L01* (см. рисунок 1.11). Прибор разработан в Институте прикладной физики Академии наук Беларуси. Он обеспечивает одновре-

менное измерение напряжений в 32 точках. Электрический сигнал с тензорезисторов подается на тензостанцию. Результаты измерений обрабатываются на компьютере. Данные опыта получают в мегапаскалях (цена деления прибора – 1 МПа).



Рисунок 1.11 – Измеритель деформаций цифровой ИДЦ-1 и тензостанция TS32L01

1.3 Охрана труда и техника безопасности при выполнении студентами лабораторных работ

1 На первом лабораторном занятии преподаватель проводит инструктаж и проверку знаний по ОТ и ТБ, о чем производится запись в журнале регистрации инструктажа. Каждый студент ставит в журнале свою подпись.

2 Включать испытательное оборудование имеет право сотрудник, прошедший специальную подготовку. **Студентам запрещено включать и выключать испытательные машины.**

3 Студенты занимают рабочие места в соответствии с указанием преподавателя.

4 На рабочем месте студенты:

- изучают методические указания по выполнению лабораторной работы;
- получают у преподавателя исходные данные (образцы для испытаний, нагрузки, размеры образцов и т. п.);
- выполняют необходимые теоретические расчеты, которые заносят в журнал лабораторных работ.

5 Во время работы машины, оборудования и т. п. не допускается:

- прикасаться к токоведущим частям электрооборудования, трубопроводам высокого давления, открывать дверцы электрошкафов и гидрооборудования;
- прикасаться руками или одеждой к испытываемым образцам, а также к подвижным частям оборудования.

6 При выполнении лабораторной работы студентам запрещается:

- устанавливать и снимать образец, перемещать специальное ограждение при включенной машине;
- находиться в пределах опасной зоны при проведении работ, связанных с разрушением образцов;
- при испытаниях в зоне упругих деформаций прикладывать к образцу нагрузку выше установленного предела;
- трогать провода и тензорезисторы;

- самовольно передвигать и переставлять измерительные приборы;
- резко вращать ручки приборов;
- оставлять (**после проведения опыта**) машину с нагрузкой и прибор

в рабочем состоянии.

7 Если при проведении лабораторных работ на установках студенты нагружают образец вручную тарированными грузами, то прорези грузов должны быть направлены в разные стороны.

После проведения испытаний грузы следует снять с кронштейна (подвеса).

8 Выполнение лабораторных работ проводится после проверки знаний студентов по технике безопасности.

1.4 План выполнения работы

1 Ознакомление студентов с оборудованием и приборами, которые будут использоваться при выполнении лабораторных работ.

2 Изучение подразд. 1.1 и 1.2 настоящих рекомендаций.

3 Изучение основных требований ГОСТов: ГОСТ 12015–66 *Пластмассы. Изготовление образцов для испытания из реактопластов. Общие требования*; ГОСТ 12019–66 *Пластмассы. Изготовление образцов для испытания из термопластов. Общие требования*; ГОСТ 12423–2013 *Пластмассы. Условия кондиционирования образцов (проб)*; ГОСТ 26277–84 *Пластмассы. Общие требования к изготовлению образцов способом механической обработки*; ГОСТ 14359–69 *Пластмассы. Методы механических испытаний. Общие требования*; ГОСТ 28840–90 *Машины для испытания материалов на растяжение, сжатие и изгиб. Общие технические требования*.

4 Ознакомление с вопросами охраны труда и техники безопасности.

5 Демонстрация видеороликов на усмотрение преподавателя.

1.5 Форма протокола испытаний

Форма протокола испытаний оформляется в качестве приложения к отчету по соответствующей лабораторной работе. Образцы оформления протоколов приведены в таблицах 1.1 и 1.2.

Результаты испытания *оформляются в виде таблицы для соответствующей лабораторной работы (см. формы таблиц) и приводятся в отчете по этой работе.*

Таблица 1.1 – Характеристики испытываемого образца в соответствии с ГОСТом

ПРОТОКОЛ механических испытаний на _____
(вид испытания)

ГОСТ на метод испытания		
Описание материала в соответствии с требованиями ГОСТа	Наименование	
	Природа и форма предмета испытания	
	Ориентация образца по отношению к изделию, из которого был вырезан данный образец	
Тип (или форма) образца с указанием метода изготовления		
Условие кондиционирования образца (ГОСТ 12423–2013)		
Условие проведения испытания (атмосферные условия), скорость нагружения		
Дата проведения испытания		

Таблица 1.2 – Испытательное оборудование и средства измерений, применяемые при проведении испытания

Номер по порядку	Применяемое испытательное оборудование	Применяемое средство измерения	Тип испытательной машины	Тип прибора для измерения удлинения
1				
2				
3				

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

2.1 Цель работы

1 Изучить требования стандартов: 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 Изучить поведение материалов аддитивного синтеза при растяжении и определить их основные механические характеристики.

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.

2.2 Порядок работы на испытательной машине

2.2.1 Краткое описание конструкции машины.

Испытания образцов из исследуемого материала на растяжение 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 (рисунок 2.1).



Рисунок 2.1 – Общий вид испытательной машины Kason WDW-1

Технические характеристики машины приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Основные технические характеристики машины Kason WDW-1

Тип	Одноколонная, настольного типа
Максимальная нагрузка, основной датчик	1000 Н
Допустимая нагрузка	0,2 %...100 % максимальной тестовой нагрузки
Диапазон нагрузки основного датчика	2...1000 Н
Предел допускаемой относительной погрешности измерения силы	±0,5 %
Предел допускаемой относительной погрешности измерения перемещения подвижной траверсы	±0,5 %
Разрешение перемещения	0,001 мм
Диапазон плавно регулируемых скоростей нагружения	0,005...1000 мм/мин
Ход траверсы (без учета захватов)	980 мм

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.

2.2.2 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.

2.2.3 Типоразмеры образцов для испытаний на растяжение.

В соответствии с ГОСТ 11262–80 *Пластмассы. Метод испытания на растяжение* применяют образцы типов 1–3 (рисунок 2.2).

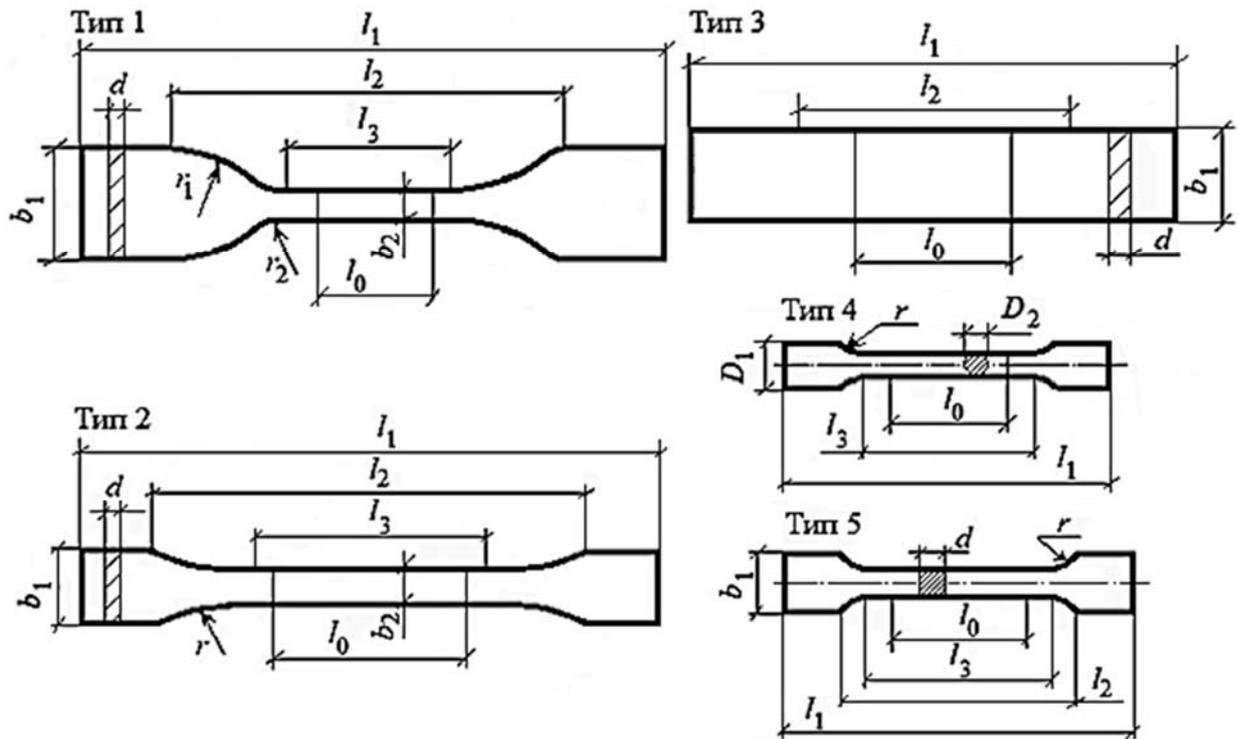


Рисунок 2.2 – Типоразмеры образцов на растяжение

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.

2.2.4 Порядок подготовки образцов к испытаниям.

Требования к подготовке образцов к испытаниям изложены в пп. 1.2–1.9 ГОСТ 11262–80.

2.2.5 Требования к оборудованию и аппаратуре.

Испытательное оборудование и измерительная аппаратура должны соответствовать разд. 2 «Аппаратура» ГОСТ 11262–80.

Размеры образцов 1–5 типов приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Размеры (в миллиметрах) образцов типов 1–5

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	$60 \pm 0,5$	–	$40 \pm 0,5$	$40 \pm 0,5$

Окончание таблицы 2.2

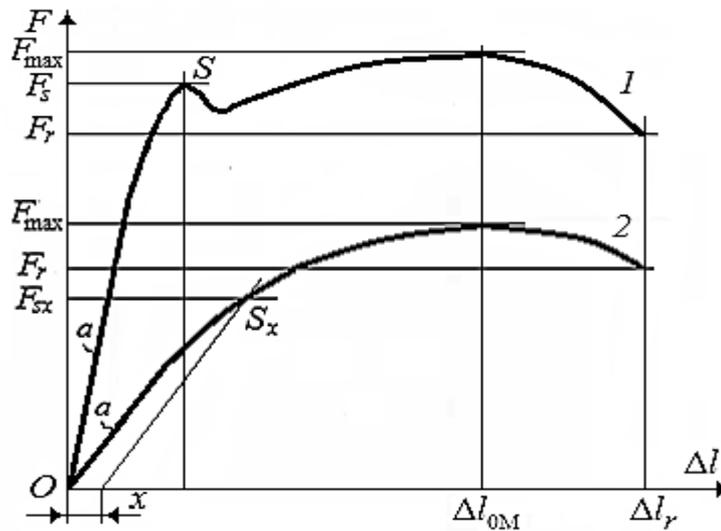
Параметр	Тип образца				
	1	2	3	4	5
Расчетная длина l_0	25 ± 1	$50 \pm 0,5$	50 ± 1	$25 \pm 0,5$	$25 \pm 0,5$
Ширина головки b_1	25 ± 1	$20 \pm 0,5$	$25 \pm 0,5$	–	$11 \pm 0,2$
Ширина рабочей части b_2	$6 \pm 0,4$	$10 \pm 0,5$	–	–	$5 \pm 0,2$
Толщина d	$2 \pm 0,2$ от 1 до 3	$4 \pm 0,4$ от 1 до 10	$2 \pm 0,2$ 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	–	–	–	$5 \pm 0,2$	–

2.3 Теоретические сведения

2.3.1 Машинная диаграмма растяжения.

Образец, закрепленный в захватах машины, деформируется (удлиняется) под действием растягивающей силы. Нагружение можно считать *статическим*, если скорость перемещения захватов постоянна и не превышает 20 мм/мин.

В результате испытаний получают *машинную диаграмму растяжения образца* (см. ГОСТ и рисунок 2.3), которая представляет собой график зависимости между силой F , действующей на образец, и его удлинением Δl .



1 – материал имеет предел текучести; 2 – материал не имеет предела текучести; а – участки прямолинейного направления диаграммы в начале кривой «нагрузка – удлинение»; S – соответствует пределу текучести; S_x – соответствует условному пределу текучести; Δl_r – удлинение образца в момент разрушения; $\Delta l_{ом}$ – удлинение образца при достижении максимальной нагрузки; x – отрезок на оси удлинения для определения условного предела текучести

Рисунок 2.3 – Диаграммы растяжения «нагрузка F – удлинение Δl » образцов из испытываемых материалов

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

- $F_{\text{рм}}$ (F_{max} , см. рисунок 2.3) – максимальная нагрузка, Н;
- $F_{\text{рр}}$ (F_r) – нагрузка, при которой образец разрушился, Н;
- $F_{\text{рт}}$ (F_s) – растягивающая нагрузка при достижении предела текучести, Н;
- $F_{\text{рту}}$ (F_{sx}) – растягивающая нагрузка при достижении условного предела текучести, Н;
- A_0 – начальная площадь поперечного сечения образца, мм²;
- $\Delta l_{\text{ом}}$ – изменение расчетной длины образца l_0 в момент достижения максимальной нагрузки, мм;
- $\Delta l_{\text{ор}}$ – изменение расчетной длины образца l_0 в момент разрыва, мм;
- $\Delta l_{\text{от}}$ – изменение расчетной длины образца l_0 в момент достижения предела текучести, мм.

2.3.2 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 ньютон на квадратный миллиметр) и относительные удлинения ε (в процентах) рассчитывают для характерных точек диаграммы. Используются следующие формулы:

- предел прочности при растяжении

$$\sigma_{\text{рм}} = \frac{F_{\text{рм}}}{A_0};$$

- нормальные напряжения при разрыве

$$\sigma_{\text{рр}} = \frac{F_{\text{рр}}}{A_0};$$

- предел текучести при растяжении

$$\sigma_{\text{рт}} = \frac{F_{\text{рт}}}{A_0};$$

– условный предел текучести

$$\sigma_{\text{пту}} = \frac{F_{\text{пту}}}{A_0};$$

– относительное удлинение при максимальной нагрузке

$$\varepsilon_{\text{рм}} = \frac{\Delta l_{\text{0М}}}{l_0} \cdot 100;$$

– относительное удлинение при разрыве образца

$$\varepsilon_{\text{рр}} = \frac{\Delta l_{\text{0Р}}}{l_0} \cdot 100;$$

– относительное удлинение при пределе текучести

$$\varepsilon_{\text{рт}} = \frac{\Delta l_{\text{0Т}}}{l_0} \cdot 100;$$

– относительное удлинение при условном пределе текучести

$$\varepsilon_{\text{рту}} = \frac{\Delta l_{\text{0Ту}}}{l_0} \cdot 100.$$

Используя полученные данные, строят *условные* диаграммы растяжения, например, показанные на рисунке 2.4.

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 АВ 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.

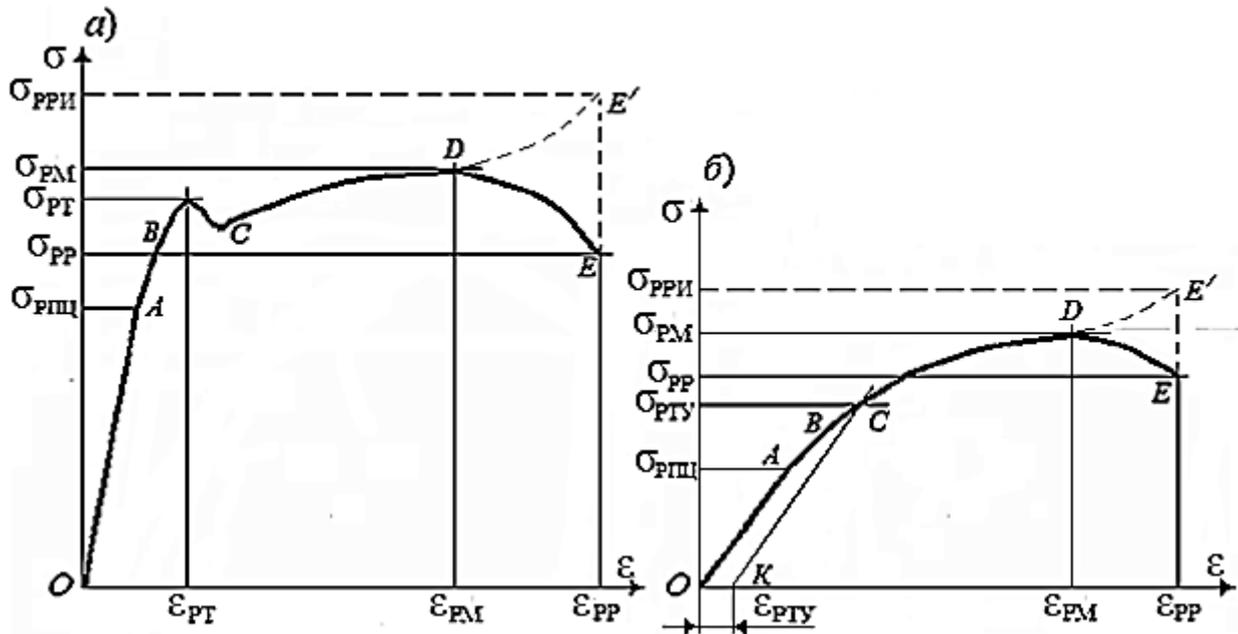
Если в этой зоне разгрузить образец, то он возвратится в первоначальное состояние. Напряжение, соответствующее точке *A*, называется *пределом пропорциональности* материала.

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

Участок *OB* плавно переходит в участок *BC* (см. рисунок 2.4, *a*): в *зону обшей текучести* или на «*площадку текучести*». Вид диаграммы на этом участке зависит от особенностей деформирования испытуемого материала и чувствительности измерительной аппаратуры.

Предел текучести – это напряжение $\sigma_{\text{рт}}$ (*S* – на рисунке 2.3, 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.



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

Рисунок 2.4 – Условные диаграммы растяжения

Некоторые материалы не имеют на диаграмме явно выраженной площадки текучести (см. рисунке 2.4, б). В этом случае определяют «условный предел текучести» – напряжение $\sigma_{PTУ}$ (S_X – на рисунке 2.3, кривая 2). Это напряжение определяют графически в точке *C* при пересечении диаграммы на участке *OB* с прямой *KC*, проведенной параллельно прямой *OA*. Отрезок *OK* (x – на рисунке 2.3, кривая 2) соответствует относительному удлинению $\epsilon_{PTУ}$. 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 называется наклепом*.

Участок *DE* называется *зоной местной текучести*. Она характерна тем, что на образце в месте будущего разрыва образуется местное сужение, так называемая *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 $\sigma - \epsilon$:

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

2) **предел текучести** ($\sigma_{\text{т}}, \sigma_{\text{рт}}, \sigma_{\text{рту}}$) – это минимальное напряжение, при котором происходит интенсивный рост пластической деформации без заметного изменения нагрузки;

3) **временное сопротивление** ($\sigma_{\text{в}}, \sigma_{\text{рм}}$) – это напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке, выдержанной образцом.

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

Наибольшее напряжение ($\sigma_{\text{рри}}$) – **истинное сопротивление разрыву**, возникает в материале в момент его разрушения (см. рисунок 2.4, точка E' на диаграмме) и определяется по формуле

$$\sigma_{\text{рри}} = \frac{F_r}{A_p},$$

где F_r – сила в момент разрушения образца;

A_p – площадь поперечного сечения шейки образца в месте разрыва.

Таким образом, напряжение $\sigma_{\text{рри}}$ есть 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, определяемые при испытании на растяжение:

1) **относительное остаточное удлинение при разрыве (в процентах)**

$$\delta = \varepsilon_{\text{рр}} = \frac{\Delta l_{\text{ор}}}{l_0} \cdot 100 = \frac{l_{\text{кон}} - l_0}{l_0} \cdot 100,$$

где $\Delta l_{\text{кон}}$ – длина образца к моменту разрушения, мм;

2) **относительное остаточное сужение при разрыве (в процентах)**

$$\psi = \frac{A_0 - A_p}{A_0} \cdot 100.$$

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

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

$$w = \frac{W_{\text{расч}}}{V_0} = \frac{F_{\text{max}} \cdot (l_{\text{кон}} - l_0) \cdot \eta}{A_0 \cdot l_0},$$

где $W_{\text{расч}}$ – работа, затраченная на деформацию и разрушение расчетной длины

образца объемом V_0 . Она численно равна площади диаграммы растяжения образца;

η – коэффициент полноты диаграммы (его величина зависит от механических свойств и, соответственно, от вида диаграммы).

Удельную работу также называют «статической вязкостью». Она является чувствительной характеристикой изменения структурного состояния материала, способности 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 , $\sigma_{рм}$), которое в этом случае является действительным пределом прочности.

2.4 Результаты испытания

Результаты испытания заносятся в таблицу 2.3 и оформляются в виде протокола испытания (см. форму протокола в подразд. 1.5).

Таблица 2.3 – 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, %	

2.5 Порядок выполнения лабораторной работы

1 Порядок выполнения работы соответствует 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 Какие напряжения действуют в поперечном сечении образца при растяжении?
- 13 Каким выражением определяется жесткость поперечного сечения при растяжении?
- 14 В каких единицах измеряются напряжения, абсолютная и относительная деформации при растяжении материала?
- 15 Как записывается закон Гука при растяжении?

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

3.1 Цель работы

1 Изучить требования стандартов: 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.

3.2 Порядок работы на испытательной машине

3.2.1 Краткое описание конструкции машины.

Испытание выполняется на машине Kason WDW-1 (см. п. 2.2.1).

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 (рисунок В.1) данного ГОСТа.

3.2.2 Проведение испытания.

Испытание на сжатие и выбор режима испытания должны соответствовать требованиям ГОСТ 4651–2014. Порядок проведения испытания соответствует п. 2.2.2.

3.2.3 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 условиям неравенства

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

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 3.1.

Таблица 3.1 – 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
<p><i>Примечания</i></p> <p>1 Допускается использовать образцы длиной $(15,0 \pm 0,2)$ мм и (30 ± 2) мм.</p> <p>2 Допускается использовать образцы длиной от 10 до 40 мм при значении безразмерного коэффициента x/l, равном 0,67.</p> <p>3 При испытании образцов из армированных композиций допускается закреплять образцы в приспособлении во избежание потери устойчивости образцов</p>				

3.3 Теоретические сведения

3.3.1 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.

3.3.2 Диаграммы сжатия.

Вид типичных кривых при данном виде испытаний (диаграмм сжатия) такой же, как и при растяжении (см. рисунок 2.3). При испытании на сжатие

3.3.3 Особенности деформирования материалов.

Образец из *пластичного материала* после испытания имеет вид, представленный на рисунке 3.2. Для таких материалов *не определяется* предел прочности. По результатам испытания определяется физический предел текучести или условный предел текучести (см. рисунок 3.1).

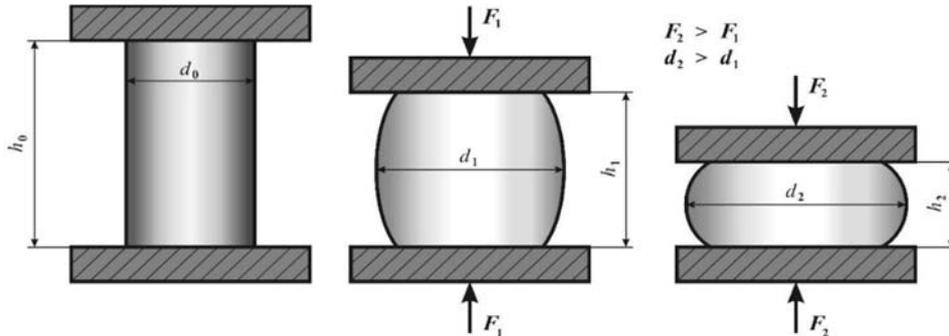


Рисунок 3.2 – Вид образца из пластичного материала при сжатии

Образец из *хрупкого материала* после испытания имеет вид, представленный на рисунке 3.3, а. Для таких материалов *не определяется* предел текучести.

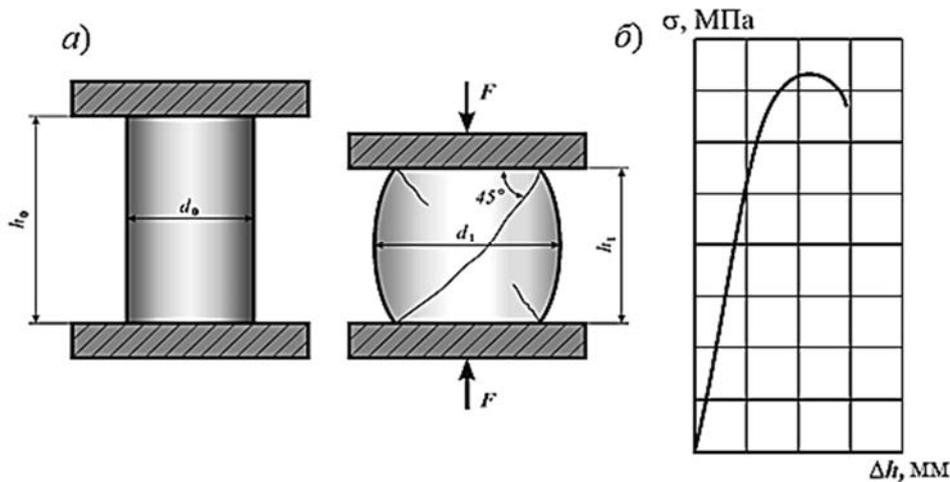


Рисунок 3.3 – Вид образца из хрупкого материала при сжатии и диаграмма сжатия

Разрушение 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.

Диаграмма сжатия хрупкого материала представляет собой нелинейную зависимость с малыми деформациями, быстрым ростом нагрузки, а испытание заканчивается разрушением образца (см. рисунок 3.3, б).

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

Анизотропными являются материалы, 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 3.4.

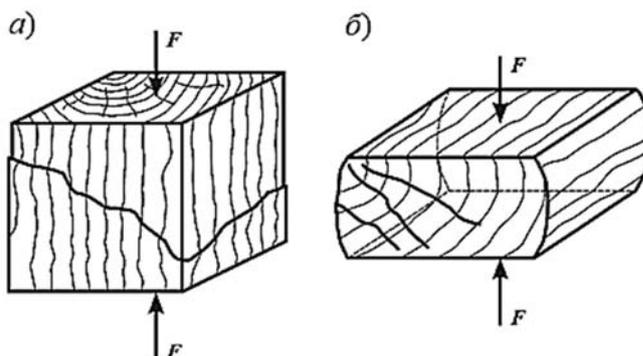


Рисунок 3.4– Вид образца из анизотропного материала при сжатии

При сжатии вдоль волокон дерево выдерживает значительно бóльшие нагрузки, чем при сжатии поперек волокон. При этом имеет место и разный характер разрушения. При сжатии деревянных образцов вдоль волокон разрушение происходит в результате сдвига слоев в плоскости, наклоненной к продольной оси под углом $45^\circ \dots 60^\circ$ (см. рисунок 3.4, а).

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 3.4, б).

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

3.4 Результаты испытания

Подготовка образцов к испытаниям осуществляется в соответствии с п. 6.2 ГОСТа 4651–2014.

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. Скорость испытания устанавливается в соответствии с п. 5.1.2 (таблица 1); требования к процессу кондиционирования образцов изложены в п. 8 вышеупомянутого ГОСТа.

Результаты испытания заносятся в таблицу (таблицы 3.2 и 3.3) и оформляются в виде протокола испытания (см. форму протокола в подразд. 1.5).

Таблица 3.2 – Результаты испытания на сжатие

Номер образца	Размер образца, мм				Нагрузка, Н		
	Ширина	Толщина	Длина	Площадь поперечного сечения, мм ²	При пределе текучести	Максимальная, выдержанная образцом	Разрушающая

Таблица 3.3 – Расчетные значения напряжений и деформаций испытания на сжатие

Нормальное напряжение, МПа				Относительная деформация, %		
При пределе текучести σ_y ($\sigma_{ст}$)	Максимальное σ_m ($\sigma_{см}$)	Разрушающее σ_b ($\sigma_{ср}$)	При установленной относительной деформации (x , %), σ_x ($\sigma_{сд}$)	Относительная (номинальная)	При пределе текучести ϵ_{cy} ($\epsilon_{ст}$)	Номинальная при разрушении ϵ_{sb} ($\epsilon_{ср}$)

Протокол испытаний должен содержать:

- ссылку на настоящий стандарт, включая тип или размеры образца и скорость испытания;
- полное описание испытуемого материала, включая его обозначение, наименование изготовителя, номер партии и предысторию, если эти сведения известны;
- описание природы и формы предмета испытания (готовое изделие или полуфабрикат, пластина или отформованный образец, включая основные размеры, форму, способ изготовления, последовательность слоев, предварительную обработку и т. д.);
- ширину, толщину и длину образца: их средние, минимальные и максимальные значения;
- любые подробности метода изготовления образцов;
- если предмет испытания является готовым изделием или полуфабрикатом, ориентацию образца по отношению к готовому изделию или полуфабрикату, из которого был вырезан образец;
- количество образцов для испытания;
- атмосферу, используемую для кондиционирования и испытания, любые особые условия кондиционирования, если необходимость этого указана в *нормативных документах или технической документации* на материал или продукт;
- погрешность измерения нагрузки испытательной машины;
- тип использованного измерителя деформации;
- тип использованного сжимающего устройства;
- информацию об использовании средства для облегчения или затруднения скольжения на торцевых поверхностях образца;

- среднее значение каждого показателя, приведенного в качестве предварительной оценки испытываемого материала;
- дату проведения испытания.

3.5 Порядок выполнения лабораторной работы

1 Порядок выполнения работы соответствует 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?
- 7 Что такое относительная деформация?
- 8 Что такое абсолютная деформация?

4 Лабораторная работа № 4. Определение механических характеристик материалов аддитивного синтеза при испытании на статический изгиб

4.1 Цель работы

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

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

4.2 Порядок работы на испытательной машине

4.2.1 Краткое описание конструкции машины.

Испытание выполняется на машине Kason WDW-1 (см. п. 2.2.1).

В соответствии с требованиями ГОСТ 4648–2014 на испытательной машине должно быть размещено приспособление для испытания на статический изгиб (рисунок 4.1) 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).

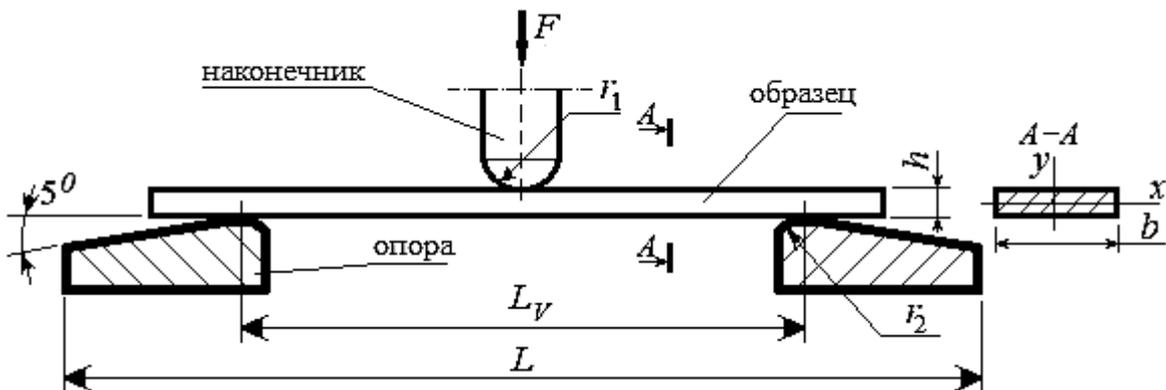


Рисунок 4.1 – Приспособление для испытания на статический изгиб

4.2.2 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.

4.2.3 Типоразмеры образцов для испытаний на изгиб.

Образцы для испытаний представляют собой пластину. ГОСТ 4648–2014 (см. разд. 2 «Подготовка к испытанию») 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.

4.3 Теоретические сведения

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

Нормальные напряжения σ в поперечном сечении образца определяются по формуле Навье:

$$\sigma = \frac{M_x \cdot y}{I_x}, \quad (4.1)$$

где 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.

Наибольшие нормальные напряжения действуют в слоях, наиболее удаленных от нейтральной линии:

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{M_x}{I_x} \cdot y_{\text{max}} = \frac{M_x}{W_x}, \quad (4.2)$$

где W_x – осевой момент сопротивления сечения.

Для прямоугольного сечения

$$I_x = \frac{b \cdot h^3}{12}; \quad W_x = \frac{I_x}{|y_{\text{max}}|} = \frac{b \cdot h^3}{12} : \frac{h}{2} = \frac{b \cdot h^2}{6}. \quad (4.3)$$

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 4.1), 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.

4.4 Результаты испытания

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

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

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 между опорами L_V устанавливают соответственно 100 и 230 мм.

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

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

Здесь 0,01 мм/мин – скорость деформации крайних волокон образца.

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

Порядок обработки результатов испытания изложен в п. 4 ГОСТа 4648–71 (см. также формулы (4.1)–(4.3)).

Изгибающий момент определяется в середине между опорами (см. рисунок 4.1):

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

где F – нагрузка, Н;

L_V – расстояние между опорами, мм.

Максимальные изгибающие напряжения ($1 \text{ МПа} = 1 \text{ Н/мм}^2$) при поперечном изгибе образца силой F

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W_x} = \frac{FL_V 6}{4bh^2} = \frac{3F \cdot L_V}{2bh^2}.$$

Образец лежит на опорах широкой стороной, следовательно, осевой момент сопротивления сечения будет минимальным. Кроме того, опорные сечения образца скользят на опорах.

Таким образом, прогиб будет увеличиваться за счет действия продольного изгиба от силы F_α (рисунок 4.2). Поэтому ГОСТ 4648–71 в расчете напряжений рекомендуется учитывать горизонтальную составляющую изгибающего момента.

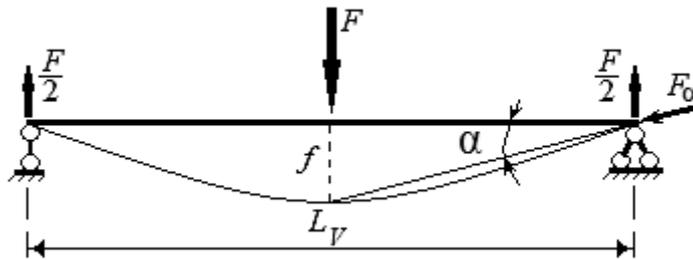


Рисунок 4.2 – К учету действия продольного изгиба

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

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

где F_α – составляющая реакции, Н;

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

По ГОСТ 4648–71 максимальные напряжения определяются выражением

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 таблицу (таблицы 4.1 и 4.2) и оформляются в виде протокола испытания (см. форму протокола в подразд. 1.5).

Таблица 4.1 – 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 образца b	Толщина образца h	Площадь поперечного сечения, мм ²			Разрушающая или заданная нагрузка, Н	Прогиб образца в середине между опорами f , мм

Таблица 4.2 – 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		

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 4.2).

4.5 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?

5 Лабораторная работа № 5. Определение модуля упругости первого рода материалов аддитивного синтеза

5.1 Цель работы

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

2 Определить модули упругости материалов при различных видах нагружения.

5.2 Порядок работы на испытательной машине

5.2.1 Краткое описание конструкции машины.

Испытания выполняются на машине Kason WDW-1 (см. п. 2.2.1).

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.

5.2.2 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).

Испытание проводят в соответствии с ГОСТ 12423–66 при температуре (23 ± 2) °С и относительной влажности (50 ± 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 протокол (таблицы 5.1–5.3) и оформляются в виде протокола испытания (см. форму протокола в подразд. 1.5).

Протокол испытаний должен содержать:

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

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

5.3 Теоретические сведения

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

Модуль упругости определяют 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 как отношение скорости перемещения подвижного элемента испытательной машины (v) к длине образца между кромками зажимов или сжимающими площадками.

При испытании на растяжение (см. п. 5.4) ГОСТ 9550–81 скорость деформации не должна превышать 20 мм/мин.

При испытании на сжатие и изгиб скорость деформации v вычисляют по формулам, приведенным соответственно в пп. 5.5 и 5.6.

5.4 Определение модуля упругости при растяжении

Форма и размеры образцов были показаны на рисунке 2.2 и приведены в таблице 2.2.

Перед испытанием на образец наносятся метки (см. рисунок 2.2 и таблицу 2.2). 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.

Таблица 5.1 – 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							

5.5 Определение модуля упругости при сжатии

База измерения деформации должна составлять не менее 10 мм и 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, следовательно, ширина основания равна 10,4 мм).

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

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

где h – высота образца, мм;

t – постоянная, равная 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.

Таблица 5.2 – 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_p , МПа

5.6 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:

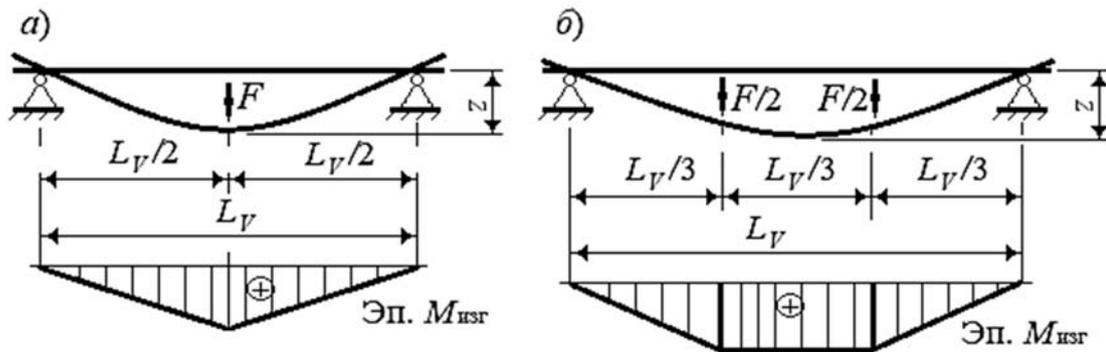
– метод А – по трехточечной схеме, когда испытуемый образец нагружают наконечником в середине расстояния между опорами (рисунок 5.1, а);

– метод Б – при нагружении по четырехточечной схеме парой наконечников, расположенных в средней трети расстояния между опорами (рисунок 5.1, б).

Прогиб измеряют:

– в методе А – в середине расстояния между опорами (см. рисунок 5.1, а). Величину прогиба оценивают по величине перемещения подвижной части нагружающего устройства;

– в методе Б – в соответствии с рисунком 5.1, б.



а – трехточечная схема; б – четырехточечная схема

Рисунок 5.1 – Схемы методов испытаний при определении модуля упругости при изгибе

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 $0,01 \text{ мин}^{-1}$;

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 $E_{\text{изг}}$, МПа, вычисляют по формулам:

– для метода А

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

– для метода Б

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

где L_V – расстояние между опорами, мм;

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

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

b – ширина образца, мм;

h – толщина образца, мм;

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

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

Таблица 5.3 – Результаты испытания по определению модуля упругости при изгибе

h , мм	b , мм	F_1 , Н	F_2 , Н	z_1 , мм	z_2 , мм	$E_{\text{изг}}$, МПа

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?

Список литературы

- 1 Конструкционные пластмассы. Свойства и применение: пер. с чешск. / И. Хуго [и др.]. – Москва: Машиностроение, 1969. – 170 с.
- 2 **Брытков, Е. В.** Механика композиционных материалов: учебное пособие / Е. В. Брытков, В. А. Санников. – Санкт-Петербург: Балт. гос. техн. ун-т, 2012. – 74 с.
- 3 **Антонова, В. С.** Аддитивные технологии: учебное пособие / В. С. Антонова, И. И. Осовская. – Санкт-Петербург: С.-Петербург. гос. ун-т пром. технол. и дизайна, 2017. – 30 с.
- 4 Методика и техника инженерного эксперимента: учебное пособие / Г. Л. Антипенко [и др.]; под общ. ред. В. П. Березиенко и В. Г. Лупачева. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2008. – 278 с.
- 5 Сопротивление материалов: лабораторный практикум: учебное издание / Под ред. Ю. П. Подлеснова. – Брянск: БГТУ, 2010. – 119 с.
- 6 **Цурпал, И. А.** Сопротивление материалов: лабораторные работы / И. А. Цурпал, Н. П. Барабан, В. М. Швайко. – Киев: Вища школа, 1988. – 245 с.
- 7 **Афанасьев, А. М.** Лабораторный практикум по сопротивлению материалов / А. М. Афанасьев, В. А. Марьин. – Москва, Физматгиз, 1975. – 287 с.
- 8 **Кузменко, И. М.** Механика материалов: учебное пособие: в 2 ч. / И. М. Кузменко. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2020. – Ч. 1. – 289 с.: ил.
- 9 **Кузменко, И. М.** Механика материалов: учебное пособие: в 2 ч. / И. М. Кузменко. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2020. – Ч. 2. – 281 с.: ил.
- 10 **Кузменко, И. М.** Механика разрушения: учебное пособие для вузов / И. М. Кузменко. – Могилев: МГТУ, 2001. – 174 с.
- 11 Сопротивление материалов. Твердость и трещиностойкость наноструктурных керамик: учебное пособие для вузов / О. Л. Хасанов [и др.]. – Москва: Юрайт, 2016. – 150 с.
- 12 **Ставров, В. П.** Механика композиционных материалов: учебник / В. П. Ставров. – Минск: БГТУ, 2008. – 262 с.
- 13 **Костиков, В. И.** Технология композиционных материалов: учебное пособие / В. И. Костиков, Ж. В. Еремеева. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. – 484 с.