

Лабораторная работа №2

«Методы механических испытаний композиционных материалов (КМ)»

Цель работы: изучить методы механических испытаний КМ и экспериментально определить механические характеристики композита при растяжении.

Теоретическая часть:

Механические характеристики – это свойства материалов, которые определяют поведение материала, его напряженное и деформированное состояние под действием внешних нагрузок.

Без знания механических характеристик материалов проектировать из них ответственные элементы конструкций не представляется возможным.

К механическим характеристикам материалов относятся **упругие характеристики** (модуль упругости E , коэффициент Пуассона ν , модуль сдвига G), **прочностные свойства** (предел кратковременной статической прочности σ_b , предел текучести σ_T или условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, предел длительной прочности σ_{-1}), **термоупругие свойства** (коэффициент линейного термического расширения α).

Основные механические характеристики материалов представлены в табл. 1.

Таблица 1.

Основные механические характеристики материалов

Свойства	Изотропные материалы	Анизотропные материалы
упругие	$E, G, \nu,$ $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$	$E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{21}, G_{12},$ $\frac{\nu_{12}}{E_1} = \frac{\nu_{21}}{E_2}$
прочностные	σ_b, σ_T или $\sigma_{0,2}$	$\bar{\sigma}_1^+, \bar{\sigma}_2^+, \bar{\sigma}_1^-, \bar{\sigma}_2^-, \bar{\tau}_{12}$
термоупругие	α	α_1, α_2

Дополнительные механические характеристики для КМ:

$$E_3, \nu_{13}, \nu_{31}, \nu_{23}, \nu_{32}, G_{13}, G_{23}, E_{ii}, \bar{\sigma}_3^+, \bar{\sigma}_3^-, \bar{\tau}_{13}, \bar{\tau}_{23}, \alpha_3.$$

Здесь E – модуль упругости, G – модуль сдвига, ν – коэффициент Пуассона, индексы 1 – вдоль волокон, 2 – поперек волокон, 3 – перпендикулярно плоскости укладки слоя, $\bar{\sigma}, \bar{\tau}$ – предел прочности при действии нормальных и касательных напряжений соответственно, «+» обозначает растяжение, «-» – сжатие.

Для композитов такими характеристиками являются **упругие и прочностные свойства** как всего композита в целом, так и однонаправленного слоя в частности.

Основной задачей при проведении механических испытаний композитов является **определение механических свойств однонаправленного слоя**, на основании которых по аналитическим зависимостям будут определяться упругие и прочностные свойства слоистого композита в целом.

Свойства слоистого композита целиком зависят от его **структуры**:

1. Материал компонентов однонаправленного слоя (матрицы и волокон);

2. Коэффициент армирования направленного слоя;

$\psi_B = \frac{V_B}{V_{KM}}$, где V_B – объем, занимаемый волокнами в композите;
 V_{KM} – объем композита в целом;

3. Толщины слоев;

4. Углы укладки слоев;

5. Последовательность укладки слоев;

6. Наличие внутренних дефектов и т. д.

Таким образом, при известных механических характеристиках однонаправленного слоя с помощью аналитических зависимостей можно определить механические характеристики всего слоистого композита, и экспериментальное определение упругих и прочностных характеристик однонаправленного слоя – важнейшая задача, без решения которой проектирование изделий из композитов невозможно.

Основные виды испытаний КМ:

1. Испытание на растяжение ($E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{21}, \bar{\sigma}_1^+, \bar{\sigma}_2^+$);

2. Испытание на изгиб ($E_1, E_n, G_{13}, \bar{\sigma}_n$);

3. Испытание на внутрислойный сдвиг ($G_{12}, \bar{\tau}_{12}$);

4. Испытание на межслойный сдвиг ($G_{13}, \bar{\tau}_{13}$);

5. Испытание на сжатие ($\bar{\sigma}_1^-, \bar{\sigma}_2^-$);

В зависимости от вида испытаний, необходимы образцы разной геометрической формы.

1 Испытания КМ на растяжение

1.1 Определение модуля упругости при растяжении

Формула для определения модуля упругости при растяжении:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F \cdot l}{A \cdot \Delta l}. \quad (1)$$

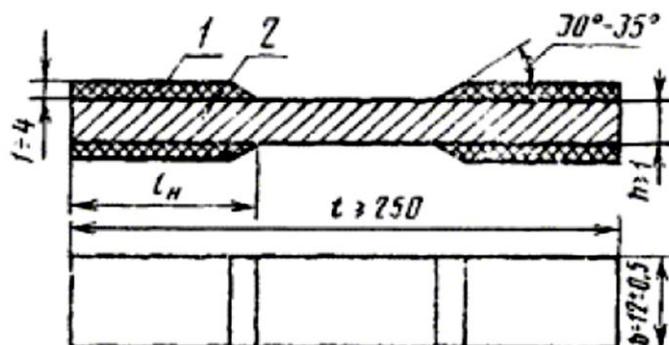
Здесь $\sigma = \frac{F}{A}$ – нормальные напряжения, действующие в поперечном сечении образца, F – растягивающее усилие, A – площадь поперечного сечения образца; $\varepsilon = \frac{l_1 - l_0}{l_0} [\times 100\%] = \frac{\Delta l}{l_0} [\times 100\%]$ – относительная деформация, l_1 – длина образца после деформации, l_0 – длина образца до деформации; Δl – абсолютная деформация.

Формула для определения коэффициента Пуассона при растяжении:

$$\nu_{12} = \frac{\varepsilon_{\text{поп.}}}{\varepsilon_{\text{прод.}}} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}. \quad (2)$$

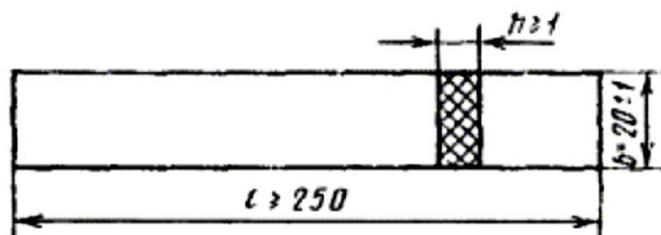
Здесь $\varepsilon_{\text{поп.}}$ – относительная поперечная деформация; $\varepsilon_{\text{прод.}}$ – относительная продольная деформация.

Образцы для определения модуля упругости и коэффициента Пуассона при растяжении:



1 - накладка; 2 - образец

Черт. 2



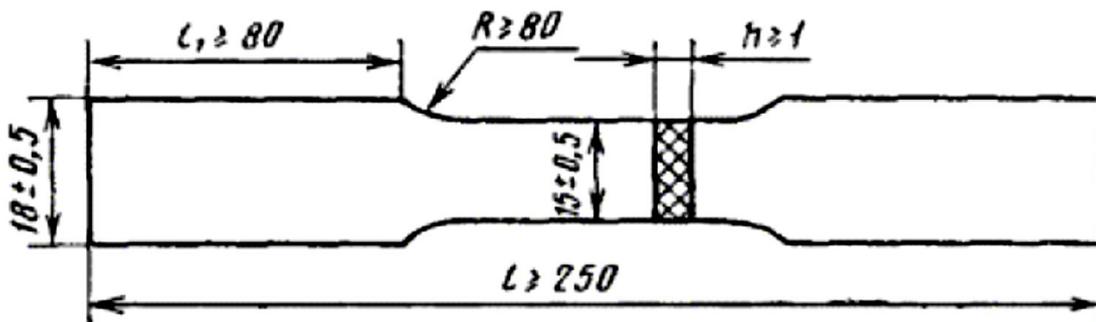
Черт. 3

1.2 Определение предела прочности при растяжении

Формула для определения предела прочности при растяжении:

$$\sigma = \frac{F}{A}. \quad (3)$$

Образцы для определения предела прочности при растяжении:



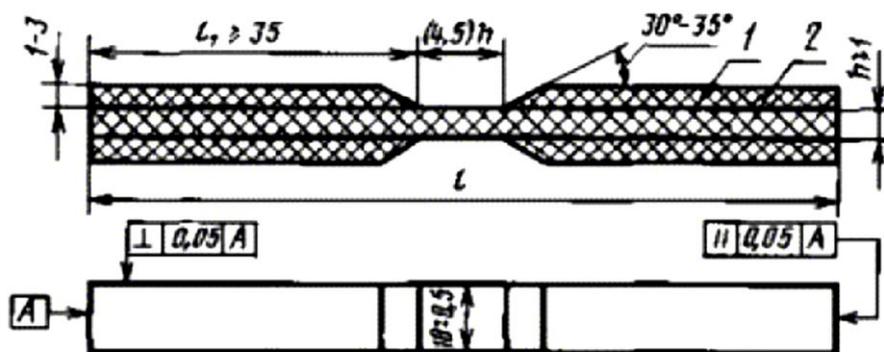
2 Испытания КМ на сжатие

Формулы при сжатии аналогичны вышеуказанным формулам для определения модуля упругости V_v – объем, занимаемый волокнами в композите; , коэффициента Пуассона (2) и предела прочности (3) при растяжении:

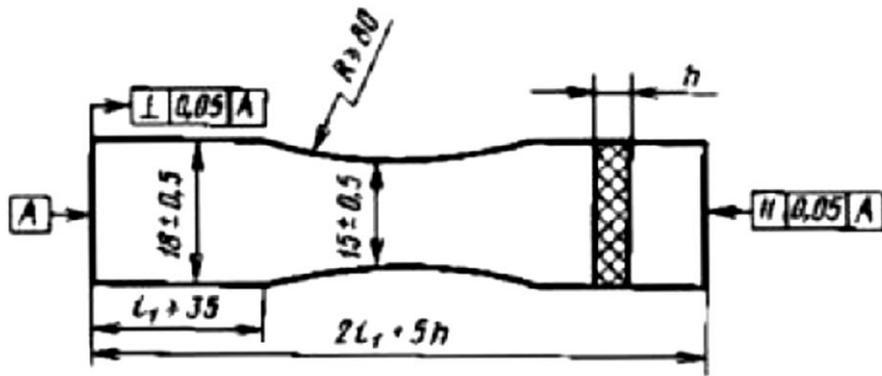
$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F \cdot l}{A \cdot \Delta l}. \quad (4)$$

Образцы для определения модуля упругости при сжатии:

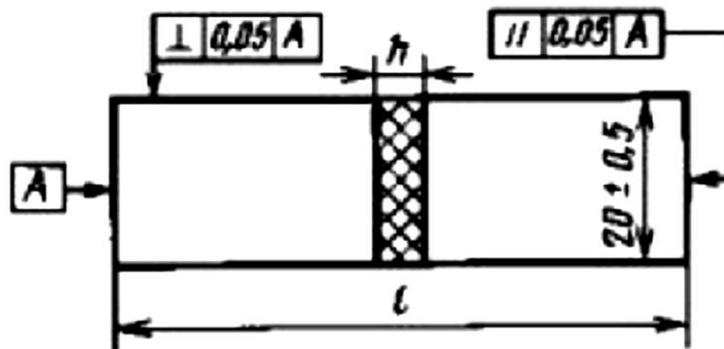
Для определения предела прочности при сжатии в направлении армирования однонаправленных композиционных материалов применяют образцы в виде полосы прямоугольного поперечного сечения 2 с закрепленными по концам накладками 1:



Для определения предела прочности при сжатии материалов с укладкой арматуры, отличной от однонаправленной, а также однонаправленных в направлении, перпендикулярном к армированию, применяют образцы шириной 15 мм или в виде двусторонней лопатки:



Для определения модулей упругости и коэффициентов Пуассона при сжатии композиционных материалов применяют образцы в виде параллелепипеда с прямоугольным основанием:



При определении упругих характеристик композитов с модулем упругости $E \geq 20$ ГПа и толщиной $h \geq 1,5$ мм при нагрузке, не превышающей 50% от разрушающей, длину рабочей части образца принимают равной 60 мм. При нагрузке, близкой к разрушающей, и других значениях E и h длину рабочей части образца, обеспечивающую его устойчивость, определяют по формуле:

$$l_{\max} \leq 0,907 \frac{h}{\mu} \sqrt{E \left(\frac{1}{\sigma_{\text{кр}}} - \frac{1,2}{G_{xz}} \right)} \quad (5)$$

где μ – коэффициент приведенной длины (для шарнирных опор $\mu = 1$)

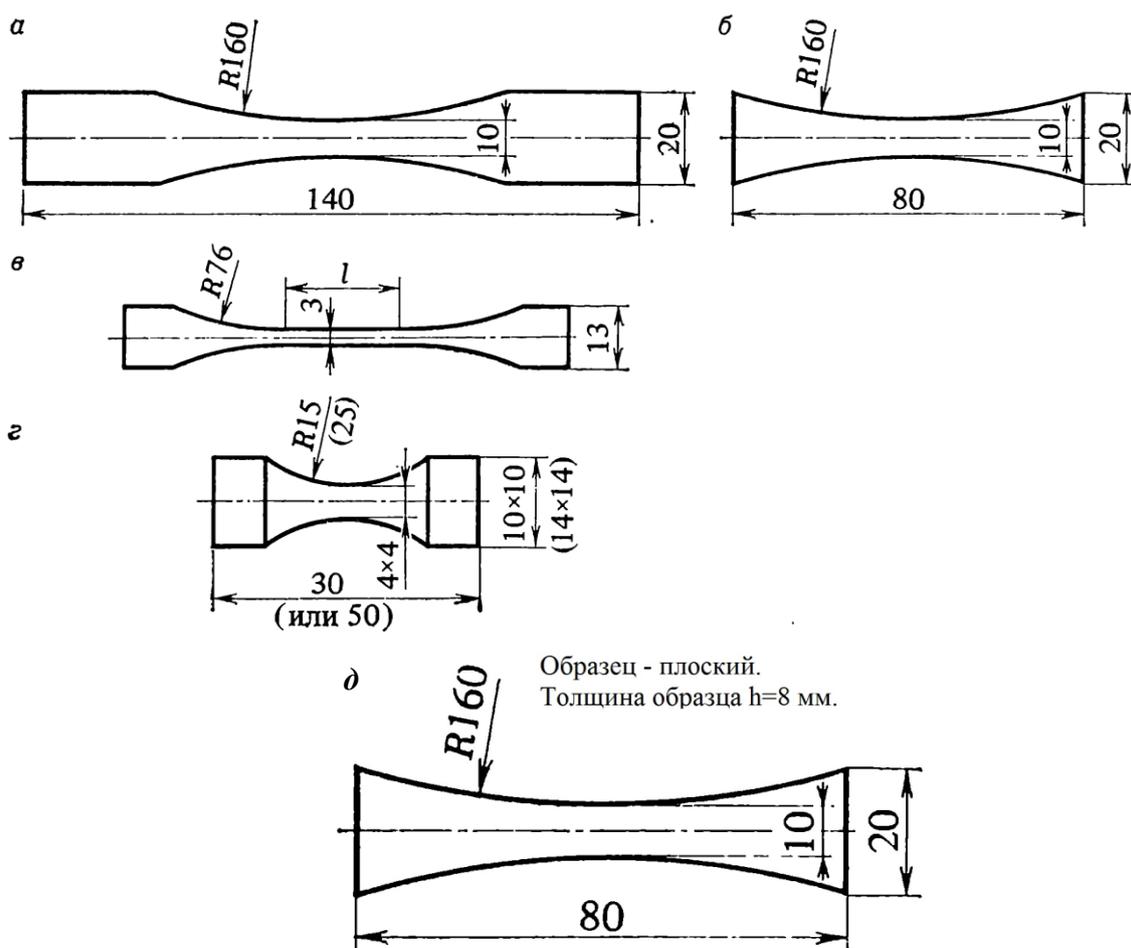
$\sigma_{\text{кр}}$ – критическое напряжение при сжатии, принимаемое для однонаправленных композиционных материалов равным $\sigma_{\text{в}}^-$, для не

однонаправленных $\sigma_{\text{кр}} = \frac{1}{2} \sigma_{\text{в}}^-$;

$\sigma_{\text{в}}^-$ – предполагаемый предел прочности при сжатии, равный пределу прочности при растяжении;

G_{xz} – модуль межслойного сдвига материала образца.

Виды образцов для испытаний на сжатие представлены на рис. далее:



Образцы на рис. а используются для материалов толщиной $h \geq 8$ мм, а на рис. б – для материалов толщиной $5 \leq h \leq 8$ мм. Для этих образцов достаточно большой радиус галтели исключает концентрацию напряжений, а переменная ширина устраняет опасность появления больших деформаций у опорных поверхностей. Образцы применяются в основном для стеклопластиков при нагружении параллельно главным осям упругой симметрии материала. При приложении нагрузки перпендикулярно слоям арматуры рекомендуется толщина образца $h = 10$ мм.

3 Испытания КМ при изгибе

3.1 Определение модуля упругости при изгибе

Формула для определения модуля упругости при изгибе:

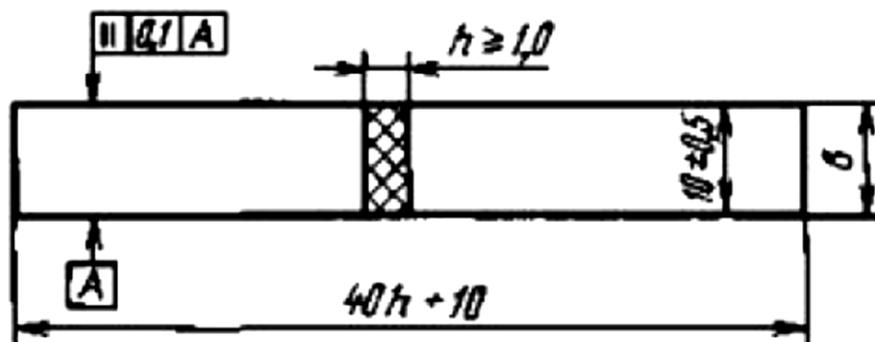
$$E_{mi} = \frac{\Delta F \ell^3}{4bh^3 \Delta \omega} \quad (6)$$

где ΔF – приращение нагрузки (Н),
 ℓ – расстояние между опорами (м),

b, h – ширина и высота образца (м),

$\Delta\omega$ – приращение прогиба в середине образца, соответствующее ΔF (Н).

Образцы для определения модуля упругости при изгибе:



3.2 Определение предела прочности при растяжении

Формула для определения предела прочности при изгибе:

$$\sigma_{нчи} = \frac{M_u^{\max}}{W_x}, \quad (7)$$

где $M_u^{\max} = \frac{F_{\max} \ell}{4}$ – максимальный изгибающий момент,

$W_x = \frac{bh^2}{6}$ – осевой момент сопротивления сечения образца.

В окончательном виде формула для определения предела прочности при изгибе выглядит следующим образом:

$$\sigma_{нчи} = \frac{1,5F_{\max} \ell}{bh^2}, \quad (8)$$

где F_{\max} – максимальная нагрузка, предшествующая разрушению образца (Н).

Образцы для определения предела прочности при изгибе аналогичны приведенным выше для определения модуля упругости при изгибе.

Деформации могут быть замерены с помощью:

1. Тензометров Аистова
2. Тензометрических датчиков сопротивления
3. Индукционных экстензометров
4. Оптических видео экстензометров

Принцип работы тензометра Аистова:

Устройство тензометра Аистова показано на рис. 1. Это – тензометр рычажной системы, у которого имеется микрометрический винт с лимбом 1, по которому и производятся отсчеты.

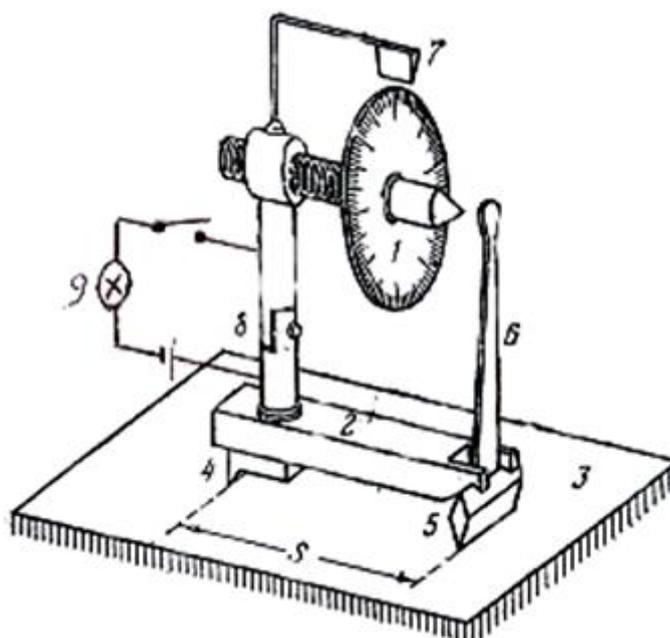


Рис. 1. Тензометр Аистова

Планка 2 прижимается к поверхности 3 испытываемого образца при помощи струбцинки, не изображенной на рисунке. Планка имеет неподвижную опору 4 и подвижную опору 5. Опору 4 заранее устанавливают на определенном расстоянии s от опоры 5. Расстояние s – база тензометра; максимальное значение базы удлинителя составляет 60 мм.

Опора 5, выполненная в виде призмы, в случае деформации поверхности испытываемого образца будет поворачиваться. Вместе с призмой поворачивается и прикрепленный к ней рычажок 6. Отношение высоты призмы к длине рычажка равно 1:5. Следовательно, перемещение верхнего конца рычажка равно измеряемому удлинению, увеличенному в пять раз.

Это перемещение определяется при помощи микрометрического винта по разности отсчета на лимбе 1 до и после деформации.

Отсчеты на лимбе берут по неподвижному указателю 7. Для того чтобы взять отсчет, нужно, поворачивая рукой лимб, довести заостренный конец винта до соприкосновения с рычажком 6.

Момент контакта определяется замыканием электрической цепи; при этом вспыхивает лампочка 9. Ток напряжением 4-6 В подается к микрометрическому винту, а отводится через рычажок 6; в стойке 8, поддерживающей винт, имеется изолирующая прокладка.

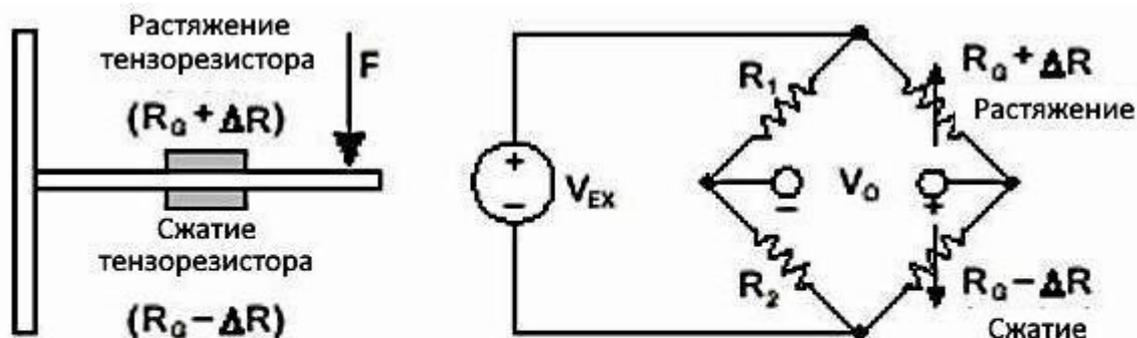
После взятия отсчета следует отвести винт обратно от рычажка, чтобы обеспечить ему возможность свободного перемещения при удлинении

образца. Этого делать не нужно, если образец при испытании не удлиняется, а укорачивается.

Шаг микрометрического винта равен 0,5 мм. Лимб разделен на 100 делений. Следовательно, поворот лимба на одно деление означает перемещение винта вдоль его оси на 0,005 мм. Это соответствует, как выше указано, удлинению образца на 0,001 мм. Таким образом, цена деления шкалы тензометра Аистова равна 0,001 мм.

Тензометрические датчики: принцип действия.

Тензометрические датчики представляют собой устройства, преобразующие измеряемую упругую деформацию твердого тела в электрический сигнал. Это происходит за счет изменения сопротивления проводника датчика при изменении его геометрических размеров от растяжения или сжатия.



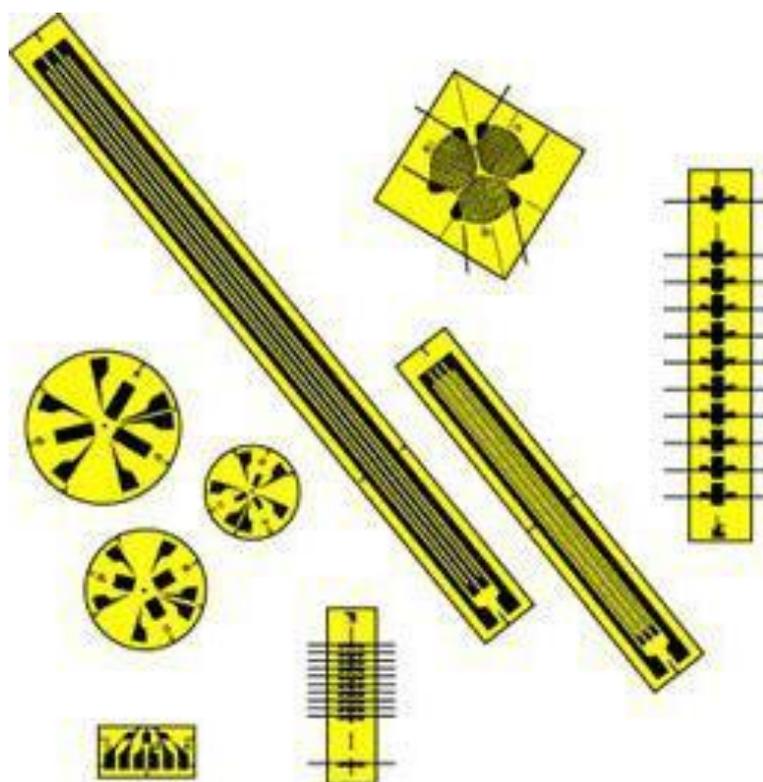
$$\frac{V_0}{V_{EX}} = -\frac{GF \cdot \epsilon}{2}$$

Основным элементом устройства является тензорезистор, закрепленный на упругой конструкции. Тензодатчики калибруют, ступенчато нагружая заданным возрастающим усилием и измеряя при этом величину электрического сопротивления. Затем по его изменению можно будет определить значения приложенной неизвестной нагрузки и пропорциональной ей деформации.

В зависимости от типа датчики позволяют измерить: силу; давление; перемещение; крутящий момент; ускорение.

Даже при самой сложной схеме нагружения конструкции действие на тензорезистор сводится к растяжению или сжатию его решетки вдоль длинного участка, называемого базой.

Больше всего распространены типы тензометрических датчиков с изменением активного сопротивления при механическом воздействии — тензорезисторы.



Проволочные тензорезисторы. Наиболее простым примером является прямолинейный отрезок тонкой проволоки, который крепят на исследуемой детали. Его сопротивление составляет:

$$r = \rho L/s,$$

где ρ — удельное сопротивление, L — длина, s — площадь сечения.

Вместе с деталью упруго деформируется наклеенная проволока. При этом меняются ее геометрические размеры. При сжатии поперечное сечение проводника увеличивается, а при растяжении — уменьшается. Поэтому изменение сопротивления меняет знак в зависимости от направления деформации. Характеристика является линейной.

Низкая чувствительность тензорезистора привела к необходимости увеличения длины проволоки на небольшом участке измерения. Для этого его делают в виде спирали (решетки) из проволоки, оклеенной с обеих сторон пластинками изоляции из пленки лака или бумаги. Для подключения к электрической цепи устройство снабжено двумя медными выводными проводниками. Они привариваются или припаиваются к концам проволочной спирали и достаточно прочны, чтобы подключиться к электрической схеме. Тензорезистор крепится на упругом элементе или исследуемой детали с помощью клея.

Проволочные тензодатчики имеют следующие **достоинства**: простота конструкции; линейная зависимость от деформации; небольшие размеры; малая цена.

К **недостаткам** относятся низкая чувствительность, влияние температуры среды, потребность в защите от влаги, применение только в

области упругих деформаций. Проволока будет деформироваться в том случае, когда сила сцепления с ней клея значительно превосходит усилия, требуемые для ее растяжения. Отношение поверхности склеивания к площади поперечного сечения должно быть 160 к 200, что соответствует ее диаметру 0,02—0,025 мм. Допускается его увеличение до 0,05 мм. Тогда при нормальной работе тензорезистора клеевой слой не разрушится. Кроме того, датчик хорошо работает на сжатие, поскольку нити из проволоки составляют одно целое с пленкой клея и деталью.

Тензодатчики из фольги. Параметры и принцип действия фольгового тензодатчика те же самые, что и у проволочных. Только материалом является фольга из нихрома, константана или титан-алюминия. Технология изготовления методом фотолитографии позволяет получить сложную конфигурацию решетки и автоматизировать процесс. По сравнению с проволочными, фольговые тензометрические датчики более чувствительны, пропускают больший ток, лучше передают деформацию, имеют более прочные выводы и сложный рисунок.

Полупроводниковые тензодатчики. Чувствительность датчиков приблизительно в 100 раз выше проволочных, что позволяет часто применять их без усилителей. Недостатками являются хрупкость, большая зависимость от окружающей температуры и значительный разброс параметров.

Характеристики тензорезисторов:

База — длина проводника решетки (0,2—150 мм).

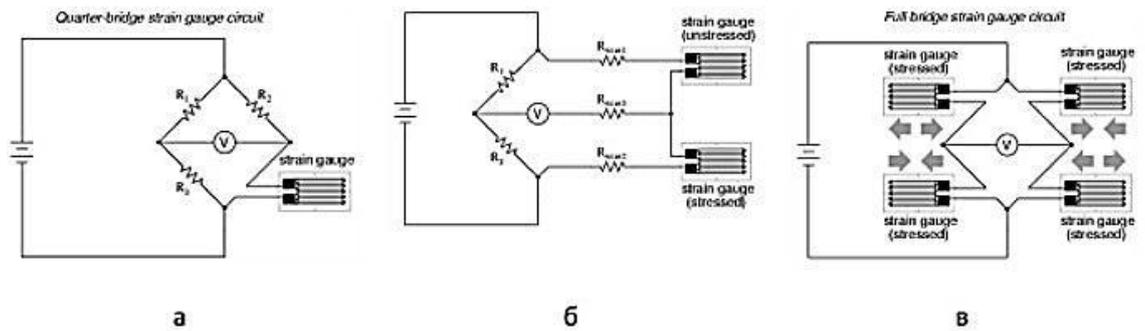
Номинальное сопротивление R — величина активного сопротивления (10—1000 Ом).

Рабочий ток питания I_p — ток, при котором тензорезистор заметно не нагревается. При перегреве изменяются свойства материалов чувствительного элемента, основы и клеевой прослойки, искажающие показания.

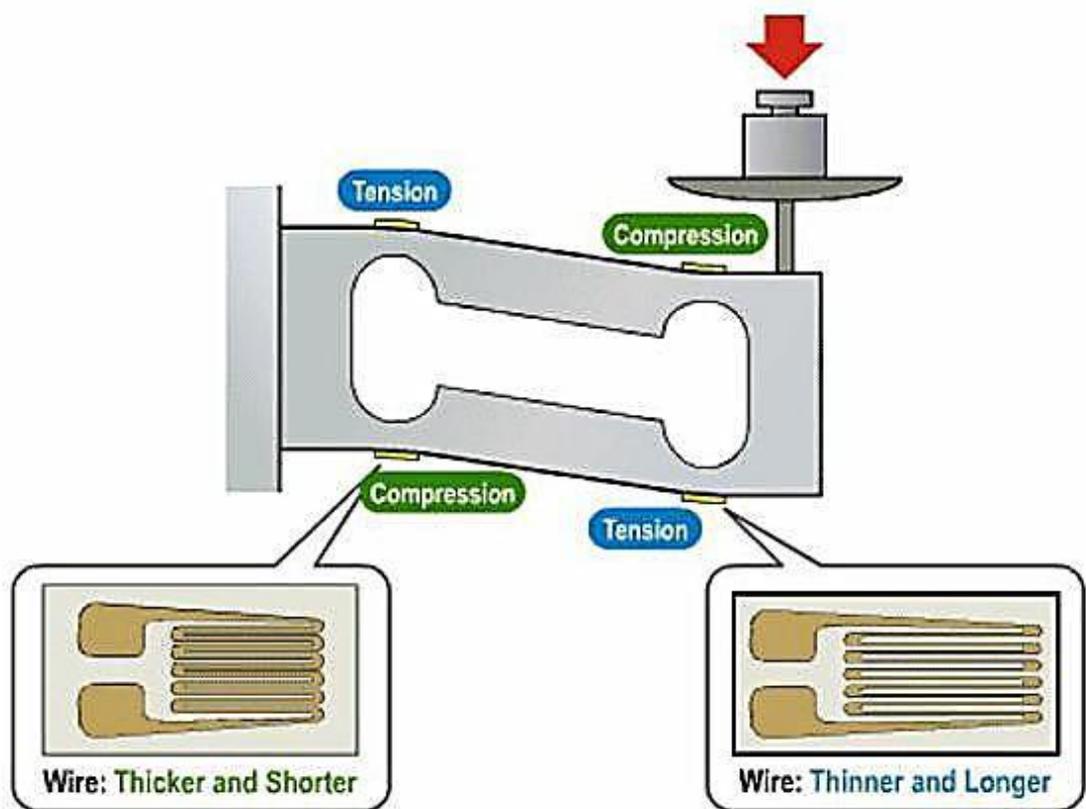
Коэффициент тензочувствительности: $s = (\Delta R/R)/(\Delta L/L)$, где R и L — соответственно электрическое сопротивление и длина ненагруженного датчика; ΔR и ΔL — изменение сопротивления и деформация от внешнего усилия. Для разных материалов он может быть положительным (R при растяжении возрастает) и отрицательным (R увеличивается при сжатии). Величина s для разных металлов изменяется в пределах от -12,6 до +6.

Схемы включения тензометрических датчиков. Для измерения малых электрических сигналов наилучшим вариантом является мостовое включение, в центре которого находится вольтметр.

Простейшим примером будет тензометрический датчик, схема которого собрана по принципу электрического моста, в одно из плеч которого он подключен. Его сопротивление в ненагруженном состоянии будет таким же, как и у остальных резисторов. В этом случае прибор покажет нулевое напряжение.



Принцип работы тензометрического датчика заключается в увеличении или снижении величины его сопротивления в зависимости от того, будут усилия сжимающими или растягивающими.



На точность показаний значительное влияние оказывает температура тензорезистора. Если в другое плечо моста включить аналогичное тензосопротивление, которое не будет нагружаться, оно будет выполнять функцию компенсационного при тепловых воздействиях. В измерительной схеме также должны учитываться значения электрических сопротивлений проводов, подключенных к резистору. Их влияние уменьшается за счет добавления еще одного провода, подключенного к какому-либо выводу тензорезистора и вольтметра. Если на упругий элемент наклеить оба датчика таким образом, чтобы их нагрузки отличались по знаку, сигнал усилится в 2 раза. При наличии в схеме четырех датчиков с нагрузками, обозначенными на схеме выше стрелками, чувствительность значительно возрастет. При

таким подключением проволочных или фольговых тензорезисторов обычный микроамперметр даст показания без усилителя электрических сигналов. Важно точно подобрать номиналы сопротивлений с помощью мультиметра, чтобы они были равны между собой в каждом плече электрического моста.

Применение тензометрических датчиков в технике:

1 Часть конструкции весов: при взвешивании корпус датчика упруго деформируется, а вместе с ним наклеенные на него тензорезисторы, соединенные в схему. Электрический сигнал передается на измерительный прибор.

2 Мониторинг напряженно-деформированного состояния строительных конструкций и инженерных сооружений в процессе их возведения и эксплуатации.

3 Тензодатчики для измерения усилия деформации при обработке металлов давлением на прокатных станах и штамповочных прессах.

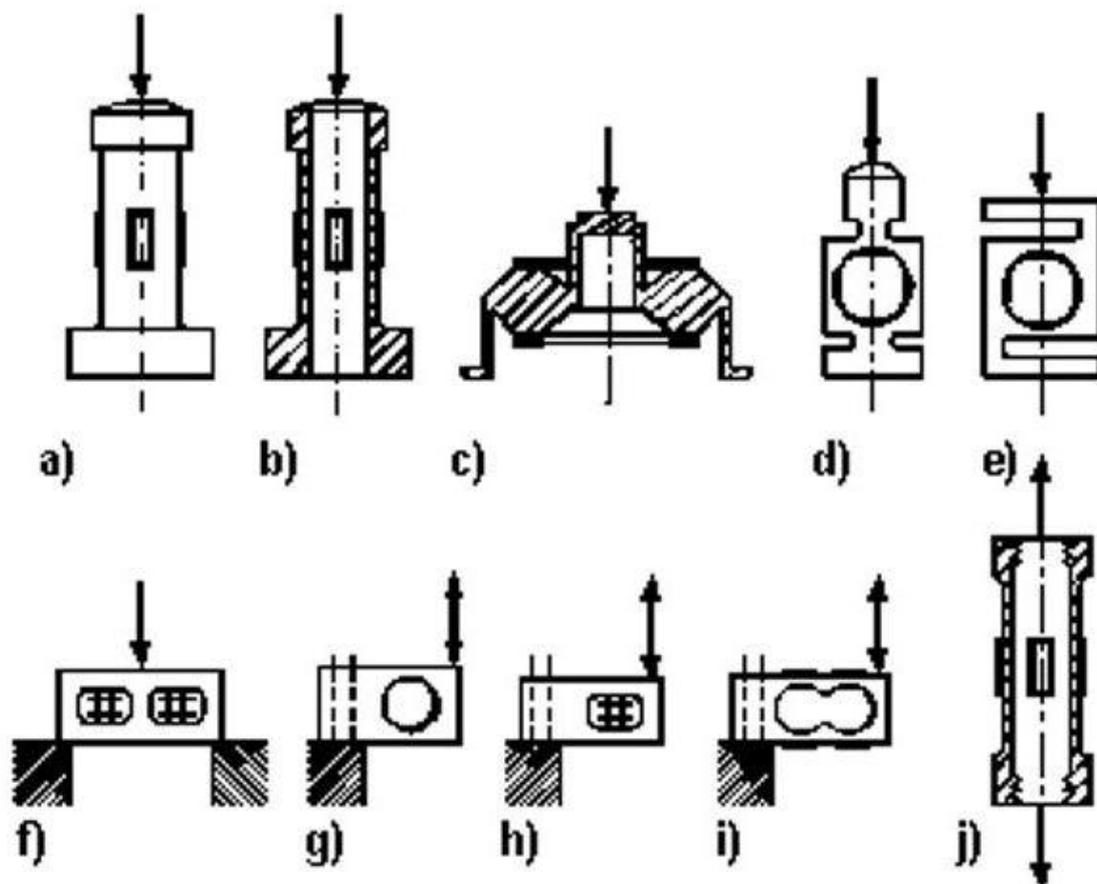
4 Высокотемпературные датчики для металлургических и других предприятий.

5 Измерительные датчики с упругим элементом из нержавеющей стали для работы в химически агрессивной среде.



Стандартные тензометрические датчики выполняются в виде шайб, колонн, простых или двусторонних балок, S-образные. Для всех конструкций важно, чтобы сила прикладывалась в одном направлении: сверху вниз или наоборот. При тяжелых условиях работы специальные конструкции дают возможность устранить действие паразитных сил. От этого в большой степени зависят их цены. На тензометрические датчики цена составляет от

сотен рублей до сотен тысяч. Многое зависит от производителя, конструкции, материалов, технологии изготовления, величин измеряемых параметров, дополнительного электронного оборудования. Большей частью они являются составными частями весов разных типов.



Заключение. Принцип работы всех тензодатчиков основан на преобразовании деформации упругого элемента в электрический сигнал. Для разных целей существуют свои конструкции датчика.

Экспериментальная часть:

Испытания КМ на растяжение. Основной целью испытания КМ на растяжение является определение модуля упругости и предела прочности композитных образцов

(!) Модуль упругости следует определять только в упругой области деформирования при нагрузках не более 20 - 40% от разрушающих.

Основные параметры, регистрируемые в ходе эксперимента:

1. Усилие;
2. Деформация рабочей части образца.

Особенности испытаний КМ:

(!) Для того, чтобы КМ (особенно углепластики) не выскальзывали из захватов в процессе испытания, необходимо использовать специальные

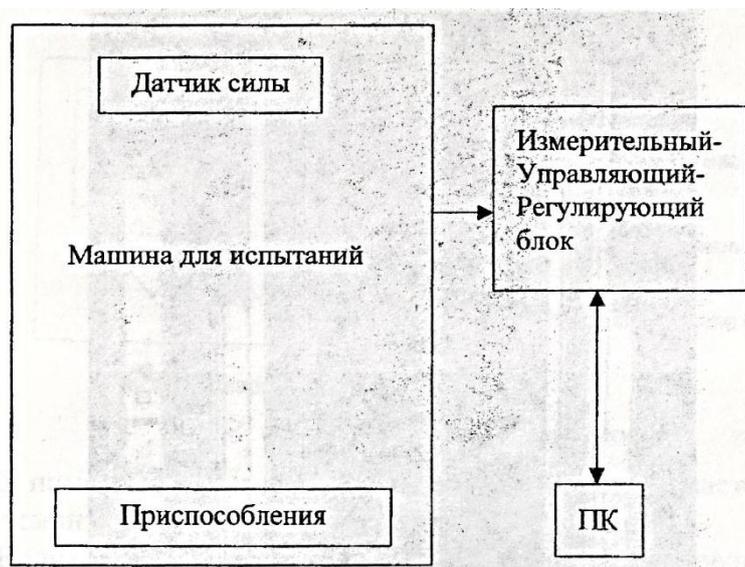
накладки (алюминиевые пластины, приклеенные к композиту) или наждачную бумагу.

Порядок проведения испытаний:

- 1) Замер геометрических параметров образца;
- 2) Установка образца вместе с накладками в захваты испытательной машины;
- 3) Затяжка захватов испытательной машины;
- 4) Замер рабочей базы образца;
- 5) Испытания образца;
- 6) Снятие диаграммы деформирования;
- 7) Обработка полученных результатов.

Используемое оборудование:

Для проведения лабораторной работы данной лабораторной работы используется испытательный комплекс, включающий в себя разрывную машину для испытаний марки Zwick T1-FR010TN.A50. Схематический обзор комплекса приведен на рис. далее.



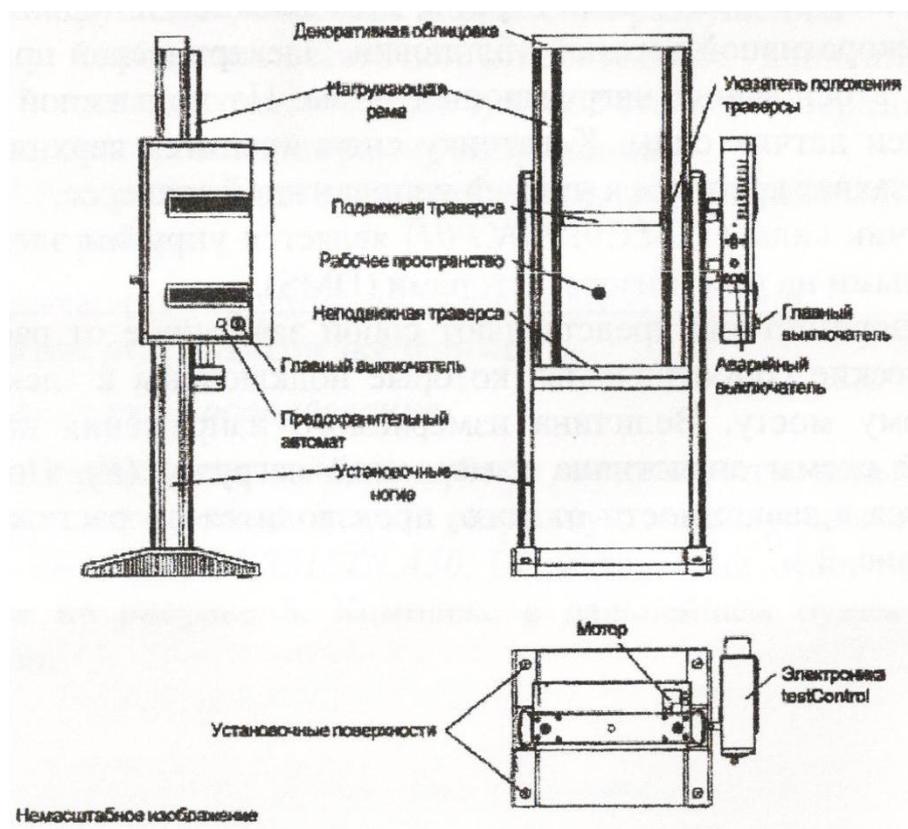
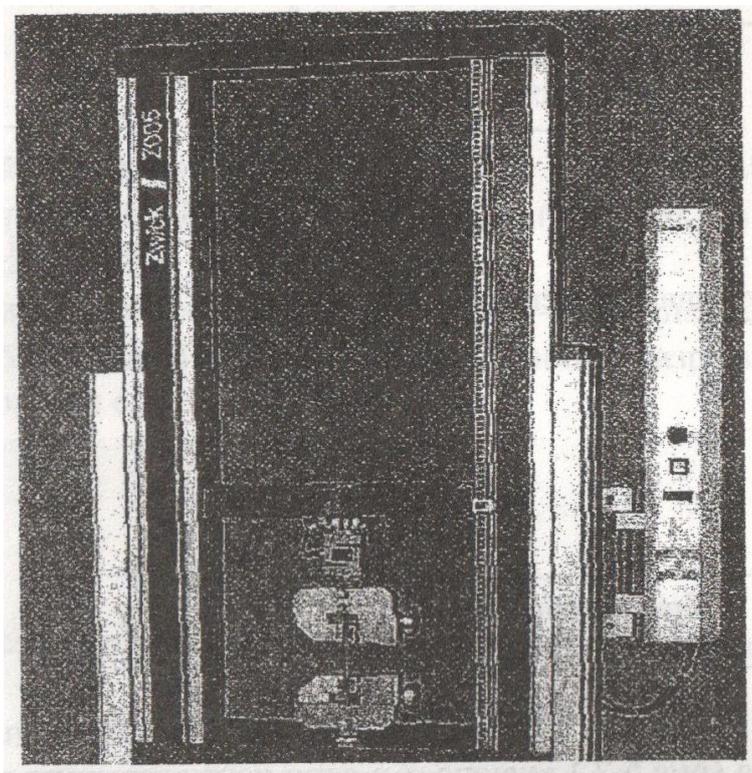
Машина включает в себя нагружающую раму, которая состоит из двух направляющих профилей с интегрированными беззазорными шариковыми парами, неподвижной и подвижной траверс и декоративной верхней облицовки. Электрический привод расположен в основании нагружающей рамы. На подвижной траверсе установлен датчик силы. К датчику силы крепится верхний захват. Нижний захват крепится к нижней неподвижной траверсе.

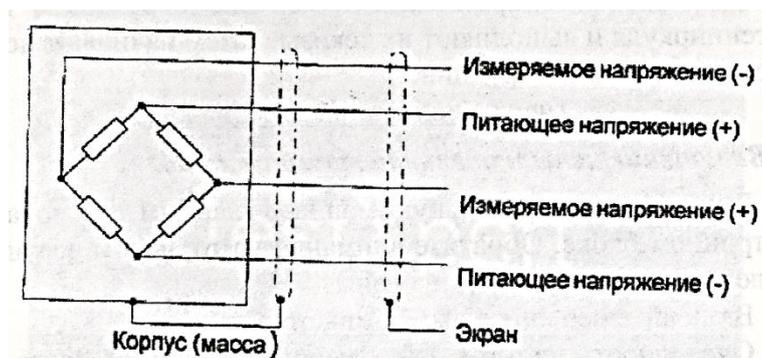
Датчик силы является упругим элементом с наклеенными на него тензорезисторами (DMS).

Тензорезисторы представляют собой зависящие от растяжения электрические сопротивления, которые подключены к электроизмерительному мосту. Величина измеряемого напряжения на

выходе мостовой схемы аналогична измеряемой нагрузке. Полярность изменяется в зависимости от того, производится ли растяжение или сжатие.

С помощью экранированного кабеля устанавливается соединение с усилителем и далее с измерительной техникой.





(!) Необходимо обратить внимание на то, чтобы соединительный кабель был свободен и надежно защищен.

Таким образом, датчик силы преобразует физические величины силы в электрически измеряемое напряжение.

Номинальное усилие	10 кН
Начальное значение диапазона измерения усилий	40 Н
Диапазон рабочей температуры	-20...+60°C

Датчик предназначен для измерений статических и динамических нагрузок при испытании на растяжение и сжатие. Должен нагружаться только в осевом направлении и только до номинальной нагрузки, т.е. до 10 кН.

Требования к отчету:

- 1) Цель работы.
- 2) Краткие теоретические сведения о механических характеристиках.
- 3) Рисунки образцов для испытаний, используемых в данной работе.
- 4) Сведения о методике замера усилий и деформаций.
- 5) Порядок проведения эксперимента.
- 6) Диаграмма деформирования.
- 7) Расчет модуля упругости.

Контрольные вопросы:

Список литературы: