

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ АНИЗОТРОПИИ УПРУГИХ СВОЙСТВ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ

Цель работы

Экспериментальное изучение анизотропии упругих свойств стеклопластика и определение количественных величин основных параметров обобщенного закона Гука.

Теоретическая часть

При работе с композиционными материалами возникает необходимость в знании их упругих свойств.

Композиционные материалы обладают существенной анизотропией упругих свойств, зависящей от схемы укладки армирующих волокон.

Многие композиты являются слоистыми с армирующими волокнами, укладываемыми во взаимно перпендикулярных направлениях.

При этом получается ортотропный материал с главными осями XU , направленными вдоль направлений армирования (рис. 1).

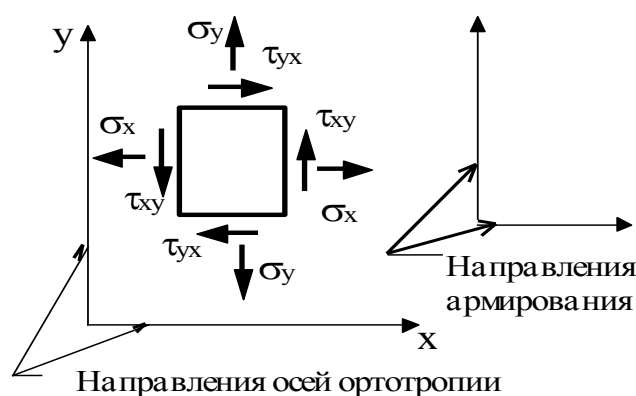


Рис. 1 Направление осей ортотропии XU и задание компонентов напряженного состояния

По отношению к данным осям XU напряжения обозначим σ_x , σ_y , τ_{xy} , а деформации ε_x , ε_y , γ_{xy} .

Обобщенный закон Гука в этом случае имеет вид / 7 /

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{1}{E_x} \sigma_x - \frac{\nu_{xy}}{E_y} \sigma_y, \\ \varepsilon_y = -\frac{\nu_{yx}}{E_x} \sigma_x + \frac{1}{E_y} \sigma_y, \\ \gamma_{xy} = \frac{1}{G_{xy}} \tau_{xy}, \end{cases} \quad (1.1)$$

при

$$\frac{\nu_{xy}}{E_y} = \frac{\nu_{yx}}{E_x}, \quad (1.2)$$

где E_x и E_y – модули упругости композита соответственно вдоль осей X и Y ;

ν_{xy} и ν_{yx} – коэффициенты Пуассона;

G_{xy} – модуль сдвига.

Рассмотрим теперь оси координат X_1X_2 , повернутые относительно базовых осей XY на угол φ (рис. 2).

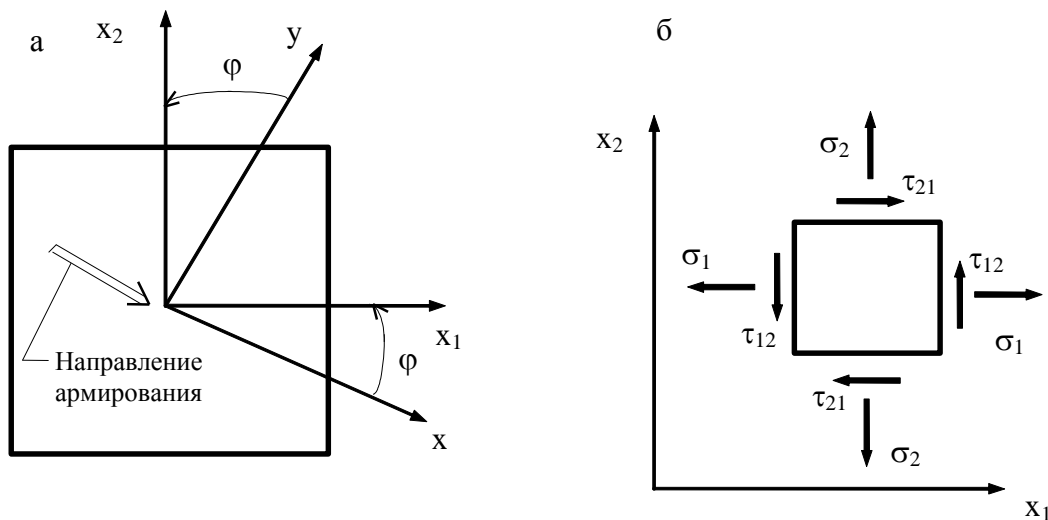


Рис. 2 Расположение осей новой ($X_1 X_2$) и старой (XY) систем координат по отношению к направлению армирования композита и задание положительного направления отсчета угла φ (а).

Компоненты напряженного состояния по отношению к осям X_1X_2 (б)

Напряжения относительно осей X_1X_2 обозначим σ_1 , σ_2 , τ_{12} , а деформации ε_1 , ε_2 , γ_{12} .

Соотношения связи между напряжениями σ_1 , σ_2 , τ_{12} и деформациями ε_1 , ε_2 , γ_{12} задаются соотношениями обобщенного закона Гука в следующей форме:

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = A_{11}\sigma_1 + A_{12}\sigma_2 + A_{13}\tau_{12}, \\ \varepsilon_2 = A_{21}\sigma_1 + A_{22}\sigma_2 + A_{23}\tau_{12}, \\ \gamma_{12} = A_{31}\sigma_1 + A_{32}\sigma_2 + A_{33}\tau_{12}, \end{cases} \quad (1.3)$$

где коэффициенты A_{ij} , $i = 1, 2, 3$, $j = 1, 2, 3$ согласно / 7 / определяются выражениями

$$\begin{cases} A_{11} = \frac{\cos^4 \varphi}{E_x} + \left(\frac{1}{G_{xy}} - \frac{2\nu_{yx}}{E_x} \right) \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi + \frac{\sin^4 \varphi}{E_y}, \\ A_{12} = \left(\frac{1}{E_x} + \frac{1}{E_y} + \frac{2\nu_{yx}}{E_x} - \frac{1}{G_{xy}} \right) \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi - \frac{\nu_{yx}}{E_x}, \\ A_{13} = \left[2 \left(\frac{\sin^2 \varphi}{E_y} - \frac{\cos^2 \varphi}{E_x} \right) + \left(\frac{1}{G_{xy}} - \frac{2\nu_{yx}}{E_x} \right) (\cos^2 \varphi - \sin^2 \varphi) \right] \sin \varphi \cos \varphi, \\ A_{21} = A_{12}, \\ A_{22} = \frac{\sin^4 \varphi}{E_x} + \left(\frac{1}{G_{xy}} - \frac{2\nu_{yx}}{E_x} \right) \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi + \frac{\cos^4 \varphi}{E_y}, \\ A_{23} = \left[2 \left(\frac{\cos^2 \varphi}{E_y} - \frac{\sin^2 \varphi}{E_x} \right) - \left(\frac{1}{G_{xy}} - \frac{2\nu_{yx}}{E_x} \right) (\cos^2 \varphi - \sin^2 \varphi) \right] \sin \varphi \cos \varphi, \\ A_{31} = A_{13}, \\ A_{32} = A_{23}, \\ A_{33} = 4 \left(\frac{1}{E_x} + \frac{1}{E_y} + \frac{2\nu_{yx}}{E_x} - \frac{1}{G_{xy}} \right) \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi + \frac{1}{G_{xy}}. \end{cases} \quad (1.4)$$

Таким образом, знание пяти упругих характеристик $E_x, E_y, \nu_{xy}, \nu_{yx}, G_{xy}$ позволяет устанавливать на основе (1.1) и (1.3) однозначную связь между компонентами напряжений и деформаций для произвольной ориентации осей системы координат.

Определим $E_x, E_y, \nu_{xy}, \nu_{yx}, G_{xy}$ из результатов испытаний при продольном деформировании плоских образцов, вырезанных из листового композиционного материала под различными углами к направлениям армирования (рис. 3).

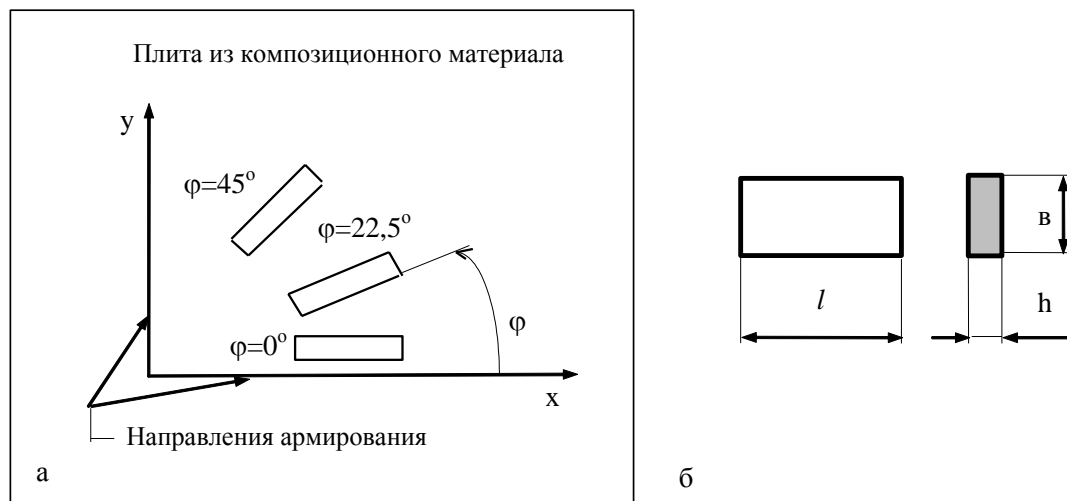


Рис. 3

а - направления вырезки;
б - форма образцов из композиционного материала

Проводим три эксперимента.

Эксперимент 1.

Образец площадью поперечного сечения A вырезан вдоль главной оси ортотропии X ($\varphi = 0^\circ$) и растянут продольной силой P_x .

В этом случае реализуется линейное напряженное состояние при

$$\sigma_x = P_x / A, \sigma_y = 0, \tau_{xy} = 0. \quad (1.5)$$

Регистрируется продольная ε_x и поперечная ε_y деформации.

Подставим (1.5) в (1.1)

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{1}{E_x} \sigma_x, \\ \varepsilon_y = -\frac{\nu_{yx}}{E_x} \sigma_x = -\nu_{yx} \varepsilon_x. \end{cases} \quad (1.6)$$

Из (1.6) получаем

$$\begin{cases} E_x = \frac{\sigma_x}{\varepsilon_x}, \\ \nu_{yx} = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x}. \end{cases} \quad (1.7)$$

Эксперимент 2.

Образец, вырезанный вдоль оси Y ($\varphi = 90^0$), растягивается силой P_y и реализуется линейное напряженное состояние

$$\sigma_x = 0, \sigma_y = P_y / A, \tau_{xy} = 0. \quad (1.8)$$

Регистрируется продольная ε_y и поперечная ε_x деформации.

Подставим (1.8) в (1.1)

$$\begin{cases} \varepsilon_y = \frac{1}{E_y} \sigma_y, \\ \varepsilon_x = -\frac{\nu_{xy}}{E_y} \sigma_y = -\nu_{xy} \varepsilon_y. \end{cases} \quad (1.9)$$

Из (1.9) получаем

$$\begin{cases} E_y = \frac{\sigma_y}{\varepsilon_y}, \\ \nu_{xy} = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y}. \end{cases} \quad (1.10)$$

Таким образом, из первых двух экспериментов находятся четыре характеристики $E_x, E_y, \nu_{xy}, \nu_{yx}$, связанные между собой равенством (1.2). Остается определить G_{xy} .

Эксперимент 3.

Образец вырезается под углом $\varphi = 45^0$ и нагружается продольной силой P_{45} . Реализуется линейное напряженное состояние

$$\sigma_1 = \sigma_{45} = P_{45} / A, \sigma_2 = 0, \tau_{12} = 0 \quad (1.11)$$

и регистрируется продольная деформация $\varepsilon_1 = \varepsilon_{45}$ в направлении угла вырезки $\varphi = 45^\circ$.

Подставим (1.11) в (1.3) и получаем

$$\varepsilon_{45} = A_{11} \sigma_{45}. \quad (1.12)$$

Из (1.12) получаем

$$A_{11} = \varepsilon_{45} / \sigma_{45} = 1 / E_{45}, \quad (1.13)$$

где E_{45} – модуль упругости под углом $\varphi = 45^\circ$.

Воспользуемся первым соотношением системы (1.4) и при $\varphi = 45^\circ$ получим

$$\frac{1}{E_{45}} = A_{11} = \frac{1}{4E_x} + \frac{1}{4} \left(\frac{1}{G_{xy}} - \frac{2\nu_{yx}}{E_x} \right) + \frac{1}{4E_y}. \quad (1.14)$$

Из (1.14) получаем

$$G_{xy} = \frac{1}{\frac{4}{E_{45}} + \frac{2\nu_{yx}}{E_x} - \frac{1}{E_x} - \frac{1}{E_y}}. \quad (1.15)$$

Знание всех пяти упругих характеристик $E_x, E_y, \nu_{xy}, \nu_{yx}, G_{xy}$ позволяет на основе (1.4) определить модуль упругости под любым углом φ

$$E_\varphi = \frac{\sigma_1^{(\varphi)}}{\varepsilon_1^{(\varphi)}} = \frac{1}{A_{11}^{(\varphi)}}. \quad (1.16)$$

Образцы и оборудование

Работа выполняется на плоских образцах размером 2 x 15 x 300 мм, вырезанных из стеклопластиковой плиты под разными углами $\varphi = 0^\circ, 22,5^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ по отношению к направлению основы (ось X) армирующей ткани в материале. Стеклопластик имеет название ЭФ-ТС-В и представляет собой слоистый материал на основе стеклоткани ТС-10 и эпоксифенольного связующего. Плита состоит из 8 слоев с толщиной $h_{\text{сл}} = 0,25$ мм. Толщина плиты $h_{\text{пл}} = 2$ мм. Схема испытательной установки показана на рисунке 4.

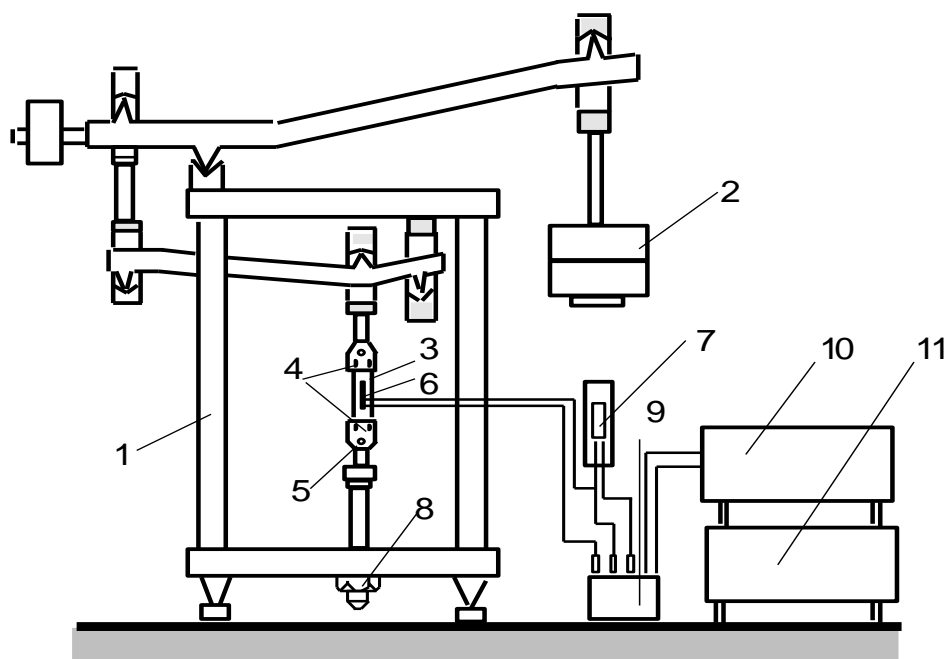


Рис. 4 Схема установки:

- 1 – рычажное нагружающее устройство, 2 – грузы, 3 – образец,
 4 – захваты, 5 – штифты, 6 – активный тензорезистор,
 7 – компенсационный тензорезистор, 8 – гайка регулировочная,
 9 – колодка для подключения тензорезисторов, 10 – тензостанция,
 11 – регистрирующий прибор

Нагружение образцов осуществляется на рычажных устройствах с предельным усилием $P_{\max} = 10$ кН и коэффициентом усиления 50.

Деформации измеряются посредством тензорезисторов, наклеенных на образцы, сигнал с которых регистрируется посредством тензостанций ТА-5 или 8АНЧ-23 (рис. 5).

Порядок проведения лабораторной работы и обработки результатов

На нагружающем устройстве (рис. 4) устанавливается испытуемый образец 3 с наклеенными на него тензорезисторами 6.

При ослабленной регулировочной гайке 8 рычажная система должна находиться в положении равновесия таким образом, чтобы верхний рычаг нагружающего устройства оставался в горизонтальном положении.

Настройка положения равновесия осуществляется путем перемещения специального противовеса, расположенного на верхнем рычаге.

Вращением регулировочной гайки выбирают зазор в цепи нагружения образца.

Активные 6 и компенсационные 7 тензорезисторы подключаются к колодке 9 по схеме полумоста (рис. 4, 5). Устанавливаются необходимые пределы измерения на тензоаппаратуре и регистрирующем приборе.

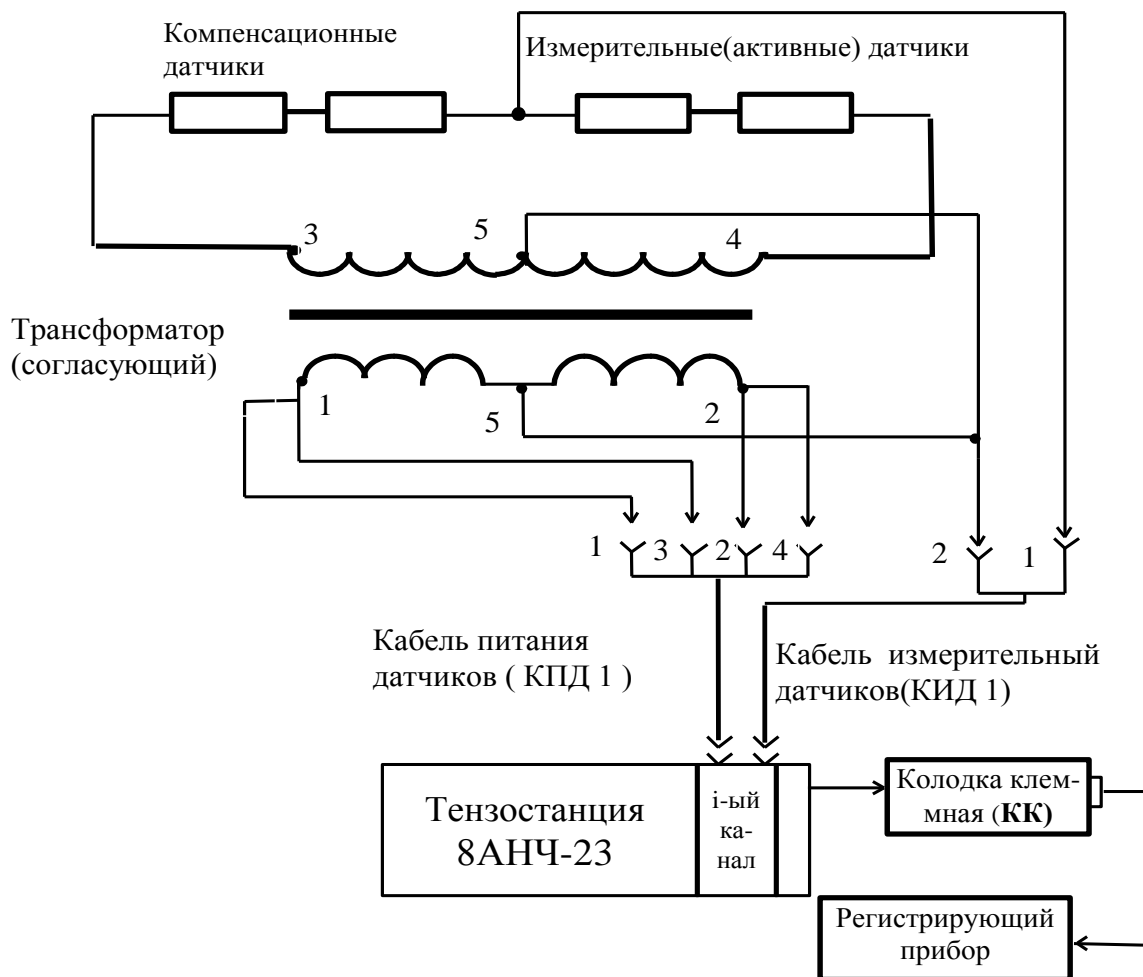


Рис. 5 Схема подключения тензодатчиков к тензостанции 8АНЧ-23

Нагружение образцов - ступенчатое, с равными приращениями нагрузки, осуществляется установкой грузов 2 (рис. 4) на грузоприемник нагружающего устройства. Реализуется 5 - 6 ступеней нагружения.

При весе груза Q_i образец растягивается силой

$$P_i = K_p Q_i,$$

где K_p – коэффициент усиления нагружающего устройства ($K_p = 50$).

В образце возникают растягивающие напряжения

$$\sigma_i = P_i / A,$$

где A – площадь поперечного сечения образца.

Значения P_i и σ_i заносятся в таблицу 1.

Деформации регистрируются по двум направлениям: вдоль и поперек продольной оси образца (рис. 6).

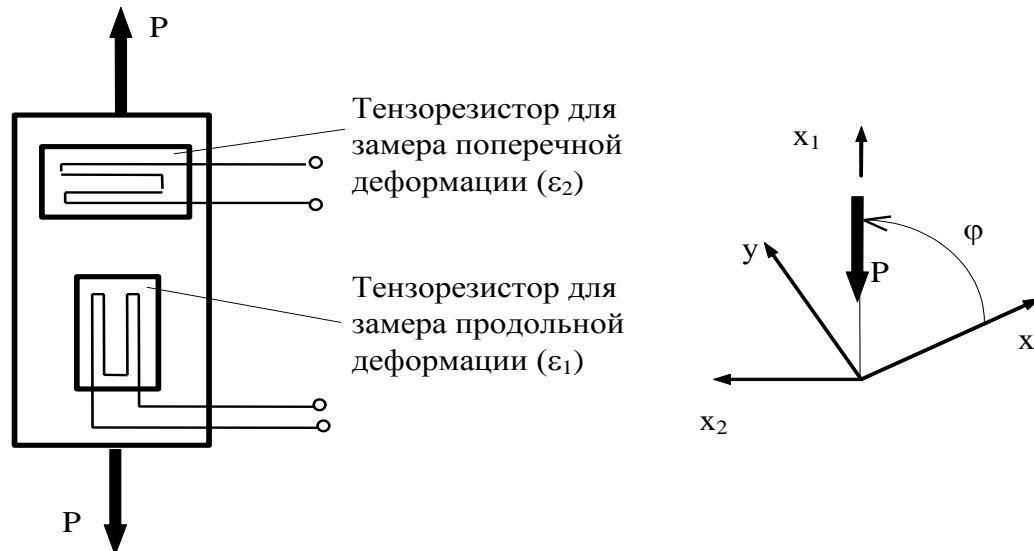


Рис. 6 Схема замера продольной ϵ_1 и поперечной ϵ_2 деформаций для образца, вырезанного под углом ϕ к направлению армирования (оси $X Y$)

Замер относительной деформации

Деформации измеряются наклеенными на образцы тензорезисторами, сигнал с которых усиливается тензоусилителями ТА-5 или 8АНЧ-23 и регистрируется на цифровом вольтметре.

Значения деформации при использовании тензоусилителя ТА-5 определяются по формуле

$$\epsilon = \frac{2\epsilon_k A_i}{s_T A_k} [\text{отн. ед.}] , \quad (1.17)$$

где A_i – показания регистратора при отсчете измеряемого сигнала;

ϵ_k – предел измерения тензоусилителя в относительных единицах;

ϵ_T – коэффициент чувствительности тензорезистора.

$A_k = A'_k - A_0$ при обозначениях:

A'_k – показания регистратора при отсчете контрольного сигнала в режиме “К”;

A_0 – показания регистратора при отсчете контрольного сигнала в режиме “0”.

Формулу (1.17) представим в виде

$$\varepsilon = K_\varepsilon A_i \text{ [отн.ед.]}, \quad (1.18)$$

где

$$K_\varepsilon = \frac{2\varepsilon_\kappa}{s_T A_\kappa}. \quad (1.19)$$

Значения деформации при использовании тензоаппаратуры 8АНЧ-23 определяются по формуле

$$\varepsilon = 2,83 \frac{4A_i K}{A_\kappa \Pi s_T K_D} \varepsilon_\kappa \text{ [отн. ед.]}, \quad (1.20)$$

где

$$A_i = A'_i - A'_0,$$

A'_i – показания регистратора при текущем значении измеряемого сигнала;

A'_0 – показания регистратора при начальном значении измеряемого сигнала;

ε_κ – значения калибровочной деформации ($\varepsilon_\kappa = 0,25 \cdot 10^{-3}$);

K – коэффициент, определяемый маркировкой предела, на котором проводилось измерение;

s_T – коэффициент чувствительности тензорезисторов ($s_T = 2,16$);

Π – число активных плеч моста ($\Pi = 1$);

K_D – значение дополнительного коэффициента усиления при работе в режиме “Ст-Дин $K \geq 1$ ” и “Дин”;

$$A_\kappa = A'_\kappa - A_0.$$

По аналогии с (1.18) формулу (1.20) представим в виде

$$\varepsilon = K_\varepsilon A_i \text{ [отн.ед.]}, \quad (1.21)$$

где

$$K_\varepsilon = \frac{4K}{A_\kappa \Pi s_T K_A} \varepsilon_\kappa. \quad (1.22)$$

В ходе испытаний для конкретного тензоусилителя определяются значения коэффициентов A'_0 , K_ε и заносятся в таблицу 1. В таблицу 1 также заносятся измеряемые значения A'_i и

производятся расчеты значений деформаций ε_i для двух направлений φ и $\varphi + 90^0$, которым соответствуют деформации соответственно $\varepsilon^{(1)}$ и $\varepsilon^{(2)}$. Затем, на миллиметровой бумаге в координате $\varepsilon^{(1)} \sim \sigma$ и $\varepsilon^{(2)}$ строятся соответствующие диаграммы деформирования материала. На диаграмме $\varepsilon^{(1)} \sim \sigma$ выбирается прямолинейный участок и определяется модуль упругости по формуле

$$E_{11} = E_{\varphi} = \frac{\sigma_{\kappa} - \sigma_{\eta}}{\varepsilon_{\kappa}^{(1)} - \varepsilon_{\eta}^{(1)}}, \quad (1.23)$$

где $\sigma_{\kappa}, \varepsilon_{\kappa}^{(1)}$ – напряжение и деформация, соответствующие концу участка;

$\sigma_{\eta}, \varepsilon_{\eta}^{(1)}$ – напряжение и деформация, соответствующие началу участка.

Кроме этого определяется коэффициент Пуассона

$$\nu_{21} = - \frac{\varepsilon_{\kappa}^{(2)} - \varepsilon_{\eta}^{(2)}}{\varepsilon_{\kappa}^{(1)} - \varepsilon_{\eta}^{(1)}}. \quad (1.24)$$

Требования к отчету

Отчет должен отражать цель работы, содержать краткое описание испытательного оборудования и образцов, включать основные положения методики проведения экспериментов и обработки результатов.

Особое внимание следует уделить правильности внесения в отчет данных экспериментов и получаемых на их основе результатов.

В отчете должны быть представлены выводы.

Контрольные вопросы

1. Дать определение изотропного и анизотропного материала.
2. Почему композиционные материалы являются анизотропными?
3. Какой материал называется ортотропным?
4. Какой вид имеет обобщенный закон Гука для ортотропного композиционного материала?
5. Какие упругие характеристики необходимы для описания упругих свойств ортотропного композиционного материала?

6. Какой вид нагружения реализуется при определении упругих характеристик ортотропного стеклопластика?

7. Какая аппаратура применяется при определении анизотропии упругих свойств стеклопластика?

8. Чем измеряются деформации на поверхности образца?

Таблица 1

Угол вырезки образца $\varphi =$, площадь поперечного сечения $A =$								
Режимы тензометрирования: вдоль образца $A_0 =$, $K_\varepsilon =$; поперек образца $A_0 =$, $K_\varepsilon =$								
i	$P_i,$ Н	$\sigma_i = P_i/A,$ Па	Вдоль оси образца			Поперек оси образца		
			A_i^1	$A_i = A_i^1 - A_0^1$	$\varepsilon_i^{(1)} = K_\varepsilon A_i$	A_i^1	$A_i = A_i^1 - A_0^1$	$\varepsilon_i^{(2)} = K_\varepsilon A_i$

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИАГРАММЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ОРТОТОРПНОГО СТЕКЛОПЛАСТИКА ПРИ РАСТЯЖЕНИИ

Цель работы

Целью работы являются изучение методики определения диаграмм деформирования, ознакомление с лабораторным испытательным оборудованием, экспериментальное определение диаграмм деформирования полимерных композиционных материалов и изучение их особенностей.

2 Теоретическая часть

Деформативность и прочность стеклопластиков в значительной мере определяются работой стеклянных волокон и полимерного связующего на всех стадиях нагружения армированной полимерной системы. В основе методов определения упругих постоянных материала и расчетов на прочность лежит представление о том, что стеклопластики на всех этапах нагружения ведут себя как сплошной монолитный материал.

В действительности при растяжении стеклопластиков в полимерной матрице возникают значительные напряжения, которые приводят к растрескиванию полимерного связующего и потере прочности композита до того, как стеклянные волокна разрушатся.

При данном процессе разрушается не только связующее, но и происходит дробление наиболее нагруженных волокон на длины определенной величины. Вблизи концов коротких волокон возникает концентрация напряжений в матрице, что приводит к дальнейшему ее локальному разрушению.

Нарушение монолитности отчетливо проявляется при построении кривых деформирования стеклопластиков. Изменение модуля упругости при достижении определенных напряжений, характерное для многих композитов на хрупких связующих, является косвенным свидетельством о существовании нижней границе для напряжений трещинообразования.

Необходимо установить уровень напряжений, до достижения которого ориентированные стеклопластики ведут себя как сплошной монолитный материал, и оценить влияние появляющихся внутренних трещин на деформативные свойства. Это требуется для уточнения диапазона применимости формул, полученных на основании гипотезы сплошности. Исследование трещинообразования необходимо так же для оценки работоспособности конструкций, к которым предъявляются жесткие требования по герметичности (баллоны высокого давления).

При проектировании композиционных материалов и прогнозировании их прочности необходимо учитывать, который из компонентов в конкретных условиях разрушится первым.

Рассмотрим процесс разрушения композита.

Обозначим предельную деформацию полимерной матрицы ε_{MR} , а арматуры ε_{AR} . Разрушающее напряжение матрицы обозначим R_M , а арматуры - R_A .

Рассмотрим случай, когда предельная деформация полимерного связующего меньше предельной деформации арматуры $\varepsilon_{MR} < \varepsilon_{AR}$.

В случае упругого поведения арматуры и матрицы законы изменения напряжения от деформации линейны вплоть до момента разрушения (рис. 1).

При этом вначале разрушится матрица с образованием трещин, а волокна арматуры продолжат нести нагрузку.

В случае, когда предельная деформация арматуры ε_{AR} меньше предельной деформации ε_{MR} матрицы $\varepsilon_{AR} < \varepsilon_{MR}$ (рис. 2) трещины не появляются вплоть до разрушения арматуры, т. к. первой разрушится арматура, а затем в результате перераспределения напряжений, разрушится матрица, и произойдет полный разрыв материала.

Очень часто прочность сцепления на отрыв R_c между матрицей и арматурой меньше прочности матрицы на растяжение R_M . При этом происходит разрушение по контактному слою между арматурой и матрицей.

В случае ортогонально армированных пластиков матрица и арматура также разрушаются одновременно и разрушение арматуры, воспринимающей основную часть нагрузки, происходит полное разрушение материала.

Если первой разрушается матрица, то до полного разрыва в армированном пластике появляются микротрещины, в результате которых теряется сплошность материала.

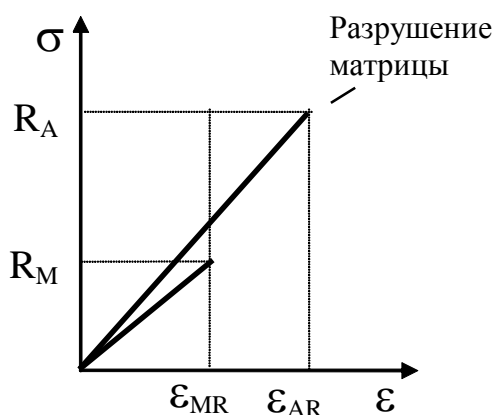


Рис. 1

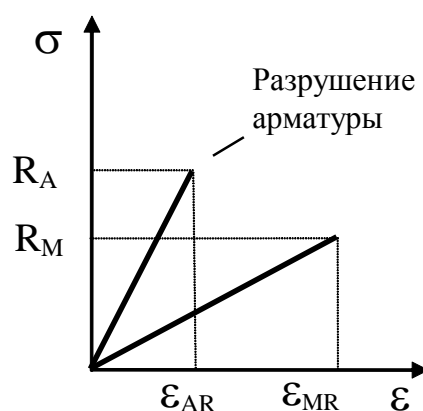


Рис. 2

В момент потери сплошности на диаграмме $\sigma - \epsilon$ образуется характерный излом (рис. 3). Наиболее чувствительными к потере сплошности при растяжении являются ортогонально армированные пластики, нагруженные в направлении армирования.

После потери сплошности всю нагрузку практически воспринимают волокна арматуры, вдоль которых приложена нагрузка.

При этом на диаграмме деформирования наблюдается излом (точка В на рисунке 3), свидетельствующий о том, что на участках АВ и ВС диаграммы модули упругости различны.

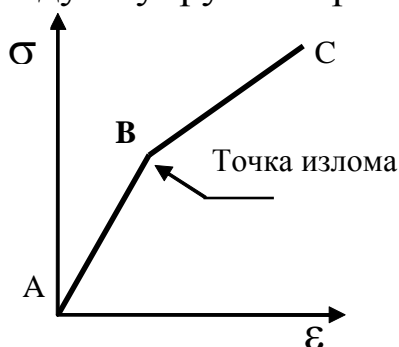


Рис. 3

Потери сплошности материала может привести к потере работоспособности конструкций, для которых важна герметичность. Примерами таких конструкций являются баллоны для хранения жидкостей и газов.

3 Образцы и оборудование

Применяются прямоугольные образцы из конструкционного стеклопластика с размерами 250x20x2 мм, вырезанные из пластины под углом 0° к основе армирующей ткани. Таким образом, нити основы располагаются параллельно (вдоль) длинной стороне образца.

Установка для испытаний образцов на растяжение смонтирована на базе разрывной испытательной машины типа FP-10 и показана на рис. 4.

Разрывная машина представляет собой две стойки - силовую 11 и приборную 15, соединенные муфтой 16. На силовой стойке имеется пульт управления нагружением 14 с тремя кнопками: “Вверх”, “Вниз”, “Стоп”, счетчиком перемещения подвижной traversы 12 испытательной машины, определяющим перемещение с точностью до 0,1 мм. В верхней части силовой стойки размещен съемный индуктивный силоизмерительный датчик (на рисунке не показан) и арретир 13, служащий для фиксации верхнего захвата машины и отключения системы измерения нагрузки при установке или снятии образца.

На приборной стойке 15 расположен циферблат силоизмерителя, пульт управления режимами работы машины 18 со сменными блоками, диаграммный аппарат машины 19, узел переключения диапазонов скоростей 17. Пульт управления режимами работы машины позволяет производить переключение и настройку диапазонов измерения нагрузки в цепи нагружения, управлять скоростью перемещения подвижной traversы 12, диаграммным аппаратом 19 и так далее. Диаграммный аппарат 19 позволяет регистрировать диаграммы усилий от времени, а так же зависимости усилий от пути перемещения подвижной traversы с одновременной записью меток времени. Максимальный коэффициент увеличения перемещения подвижной traversы 12 на диаграммном аппарате равен 10.

Испытательная машина FP-10 имеет 5 диапазонов измерения нагрузки: от (0 - 0.2 Н) до (0 - 10 кН) с погрешностью измерения $\pm 1 \%$. Четыре диапазона скоростей перемещения подвижной traversы обеспечивают плавное регулирование в пределах 0,04 - 1000 мм/мин.

Образец 1 установлен в клиновых захватах испытательной

машины. Верхний захват 3 машины считается условно неподвижным (неактивным), нижний захват 4 - подвижный или активный, закреплен на подвижной траверсе 12.

На рабочей части образца установлены два экстензометра 2, предназначенные для измерения удлинения рабочей части при нагружении. Экстензометры закреплены на образце с помощью неподвижных ножей 5 и подвижных ножей 6. Подвижные ножи связаны посредством тяги 7 с шарнирными соединениями на концах связаны с сердечником 9 катушки индуктивности 10. Слабая пружина 8 предназначена для возврата подвижных ножей в начальное положение после проведения измерений. При проведении измерений во время эксперимента подвижные ножи 6 перемещаясь изменяют положение сердечника 9. В результате изменяется индуктивность катушки 10. Данное изменение преобразуется с помощью преобразователя сигналов 23 в электрические сигналы управления диаграммным аппаратом экстензометра 21. Преобразователь сигналов имеет переключатели диапазонов и позволяет увеличить удлинение рабочей базы образца в 200, 1000 и 2000 раз.

Результаты испытаний записываются в виде диаграммы усилие - удлинение базы образца на диаграммной ленте, закрепленной на барабане диаграммного аппарата экстензометра. Регистрация удлинений базы образца производится по длине диаграммной ленты, то есть по окружности барабана диаграммного аппарата экстензометра. Величина усилия пропорциональна перемещению вдоль образующей барабана каретки с пишущим пером, связанной посредством струны 20 с кареткой диаграммного аппарата машины FP-10. Груз 22 поддерживает струну в натянутом состоянии.

Таким образом, перемещения кареток диаграммных аппаратов разрывной машины и экстензометра в направлении измерения усилий (по ширине диаграммной ленты) равны. Ширина диаграммной ленты - 250 мм.

4 Порядок проведения лабораторной работы

Установить скорость перемещения подвижной траверсы испытательной машины равную 5 мм/мин.

При закрытом арретире 13 (рис. 4) установить выбранный образец для испытаний в захваты разрывной машины FP-10, предварительно измерив его площадь поперечного сечения на длине

рабочей базы для 5-ти сечений и вычислив среднюю.

Установить экстензометры на образце, как показано на рис. 4.
Длина рабочей базы образца - 40 мм.

Открыть арретир, выбрать диапазон измерения нагрузки от 0 до 10 кН и настроить силоизмеритель машины на начальное значение.

Подключить к сети 220 в преобразователь сигналов, установить диапазон увеличения удлинения равный 200, нажав соответствующую кнопку, и настроить начальную точку записи диаграммы вращением ручки потенциометра на лицевой панели преобразователя.

На пульте управления нагружением включить кнопку “Вниз”, начав тем самым нагружение образца. При этом на диаграммном аппарате экстензометра будет записываться диаграмма деформирования.

По достижении усилия 8 кН остановить нагружение, нажав кнопку “Стоп”, и начать разгрузку образца (нажав кнопку “Вверх”), записывая диаграмму при разгрузке.

По завершении разгрузки закрыть арретир и выключить машину.

После проведения эксперимента отрезается часть диаграммной ленты с диаграммного аппарата экстензометра, содержащая полученную диаграмму усилие - удлинение. С диаграммы снимаются значения удлинений и соответствующих им усилий в миллиметрах для режимов нагружения и разгрузки и заносятся в таблицу 1.

Таблицу 1

№ точки	Удлинение базы образца Δl , мм	Усилие при нагружении P , мм	Усилие при разгрузке P , мм	Относительное удлинение ε	Напряжение при нагружении σ , МПа	Напряжение при разгрузке σ , МПа

По формуле вычисляется относительное удлинение:

$$\varepsilon = \frac{\Delta \ell}{K_D \cdot \ell_B},$$

где K_D - коэффициент увеличения экстензометра;

$\Delta \ell$ - удлинение базы образца в мм;

ℓ_B - длина базы измерения удлинений (рабочей базы) в мм.

Далее определяются напряжения:

$$\sigma = \frac{K_y \cdot P}{A_{cp}},$$

где P - величина усилия соответствующая точке на диаграммной ленте в мм;

K_y - коэффициент соответствия координаты точки на диаграммной ленте по оси нагрузки в мм к величине усилия в Н, определяется как отношение верхнего предела диапазона измерения усилий разрывной машины к длине рабочей зоны на диаграммной ленте по оси нагрузки;

A_{cp} - средняя площадь поперечного сечения образца.

При заполнении таблицы рекомендуется выбирать с графика на диаграммной ленте такое количество точек, которое наиболее полно отразит все особенности диаграммы.

На основе полученных результатов строится диаграмма деформирования изучаемого стеклопластика в координатах $\sigma \sim \varepsilon$ как при нагружении так и при разгрузке. Пример подобной диаграммы показан на рисунке 5.

На участке нагружения определяется точка излома диаграммы, соответствующие ей напряжение и деформация, начиная с которых интенсивно происходит процесс нарушения сплошности материала.

Модули упругости при растяжении находятся для участка диаграммы деформирования до ε' , для участка после ε' и при разгрузении. Для этого выбирается прямолинейный участок на диаграммы деформирования, ограниченный точками с координатами $(\sigma_2, \varepsilon_2)$ и $(\sigma_1, \varepsilon_1)$. Модуль упругости находится по формуле:

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}.$$

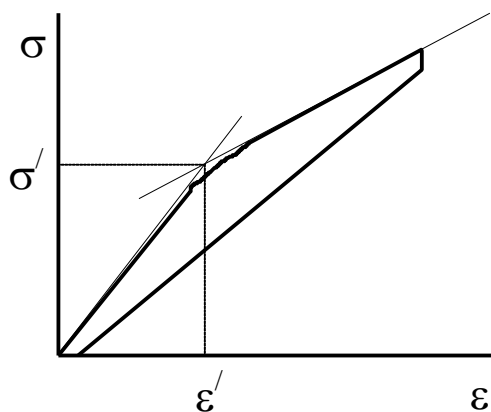


Рис. 5 Пример диаграммы деформирования стеклопластика при нагружении и разгрузке

5 Требования к отчету

Отчет по лабораторной работе должен отражать цель работы, содержать описание образцов, оборудования, схему испытаний, таблицу результатов и графически изображенную диаграмму деформирования как при нагружении так и разгрузке.

Особое внимание следует уделить правильности внесения в отчет экспериментальных результатов. В отчете должны быть представлены выводы.

6 Контрольные вопросы

1. С помощью какой аппаратуры регистрируется диаграмма деформирования образца из полимерного композиционного материала ?
2. Какой вид имеют диаграммы деформирования полимерных композиционных материалов?
3. Какой вид разрушения определяет величину напряжений для полимерных композиционных материалов, используемых в сосудах, работающих под давлением?

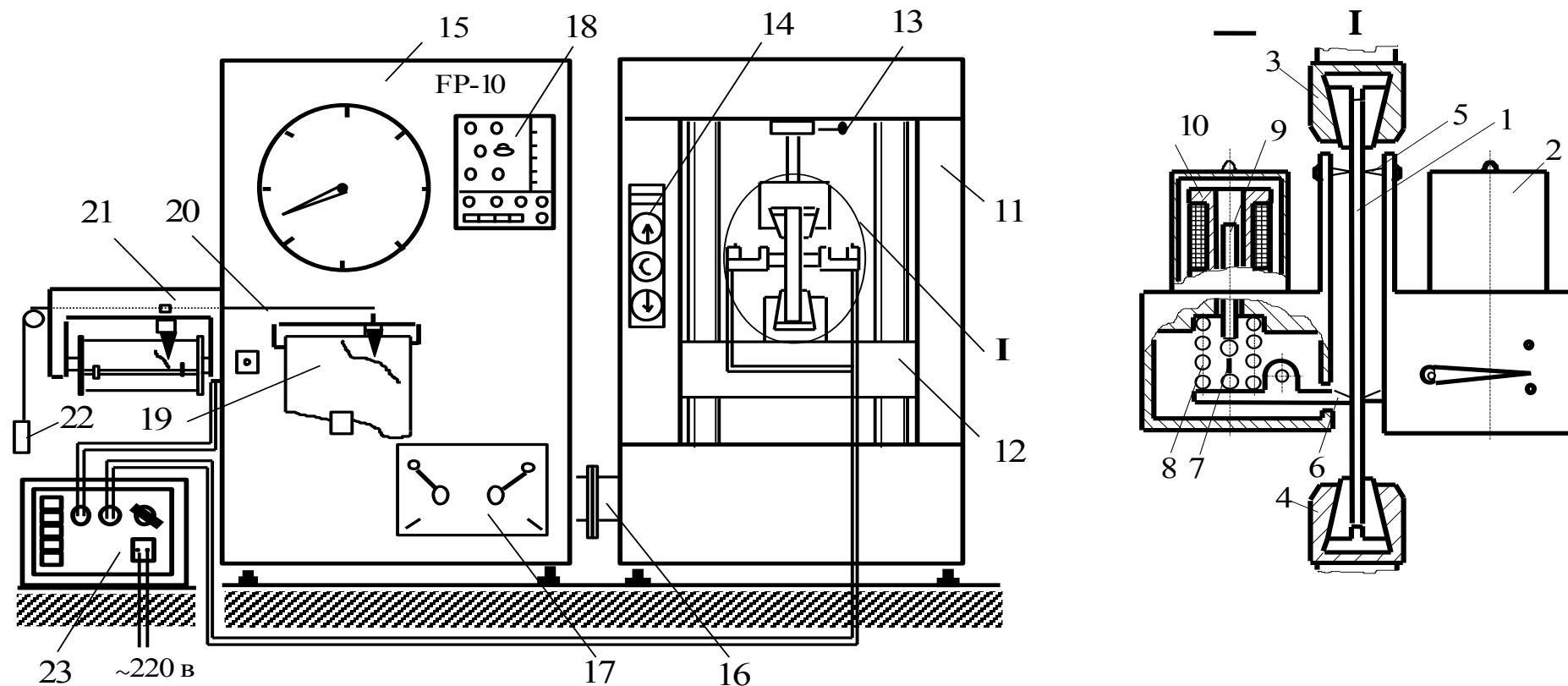


Рис. 4 Установка для испытания образцов на растяжение

1 – образец; 2 – экстензометр; 3 – верхний (неподвижный) захват машины; 4 – нижний (подвижный) захват машины; 5 – неподвижные ножи экстензометра; 6 – подвижные ножи экстензометра; 7 – тяга; 8 – пружина; 9 – сердечник; 10 – катушка индуктивности; 11 – силовая стойка разрывной машины FP-10; 12 – подвижная траверса; 13 – арретир; 14 – пульт управления нагружением; 15 – приборная стойка машины FP-10; 16 – муфта; 17 – узел переключения скоростей; 18 – пульт управления режимами работы машины; 19 – диаграммный аппарат машины; 20 – струна; 21 – диаграммный аппарат экстензометра; 22 – груз; 23 – преобразователь сигналов

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ СДВИГА ПРИ КРУЧЕНИИ ТРУБЧАТЫХ ОБРАЗЦОВ ИЗ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

Цель работы

Целью данной работы является изучение метода определения модуля сдвига из испытаний на кручение трубчатых образцов, экспериментальное определение модуля сдвига композиционного материала и освоение методики обработки результатов.

Теоретическая часть

Рассмотрим трубчатый образец, нагруженный по торцам крутящим моментом M_y (рис. 1).

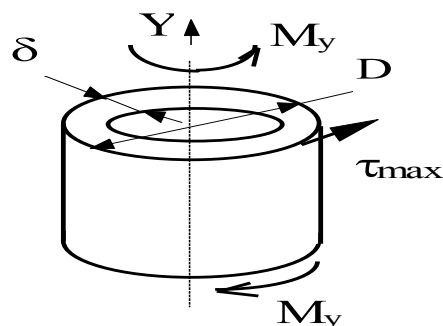


Рис. 1. Нагружение трубчатого образца при кручении

На его поверхности возникают касательные напряжения

$$\tau_{\max} = M_y / W_p. \quad (3.1)$$

Здесь

$$W_p = \frac{\pi D^3}{16} \left[1 - \left(\frac{D-2\delta}{D} \right)^4 \right], \quad (3.2)$$

где D - наружный диаметр образца;

δ - толщина стенки образца.

Выделим на поверхности образца малый элемент размером $dy \times dy$, работающий в условиях чистого сдвига при напряжениях $\tau_{xy} = \tau_{yx} = \tau_{\max}$ (рис. 2).

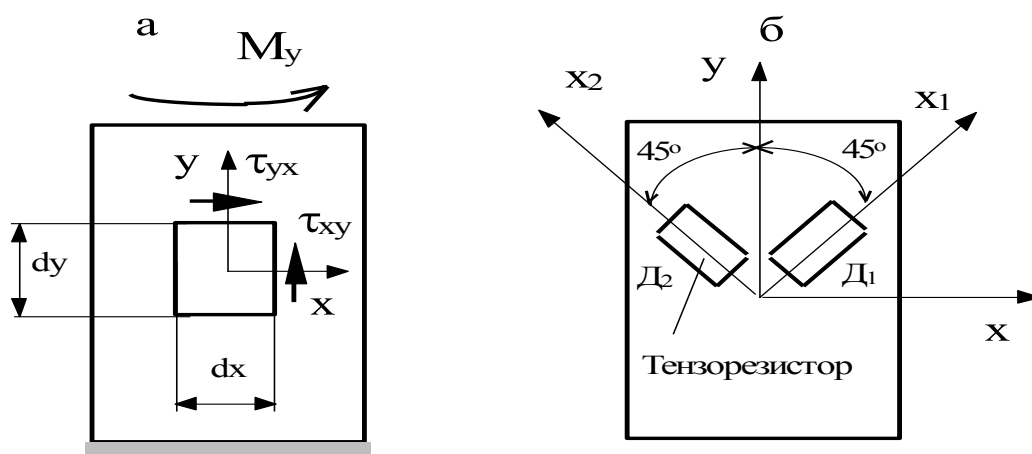


Рис. 2

а – выделение малого элемента на поверхности трубки

б – схема наклейки тензорезисторов

С элементом связаны оси X и Y (рис. 2, 3). При этом ось Y параллельна продольной оси образца (рис. 2).

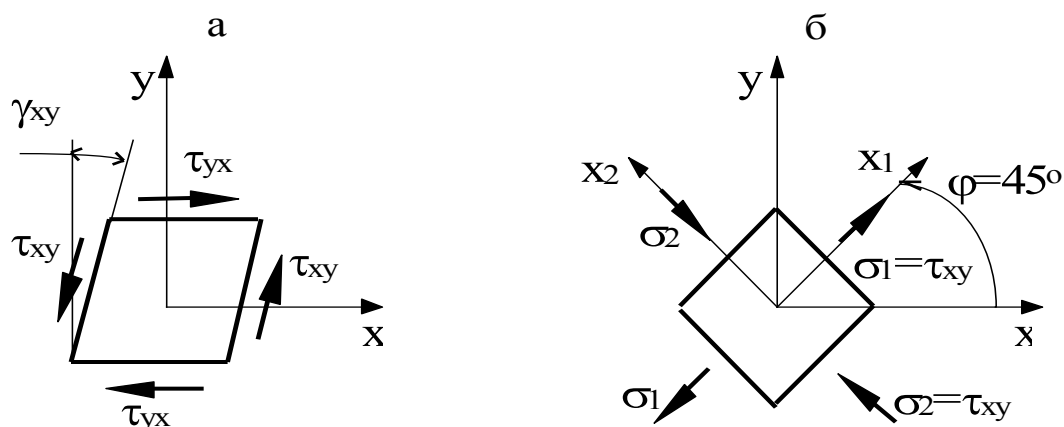


Рис. 3

а – напряжения τ_{xy} (τ_{yx}) по отношению к осям XY (а)

б – напряжения σ_1, σ_2 по отношению к повернутым осям X_1X_2

Пусть материал образца ортотропный и главные оси анизотропии композита совпадают с осями X, Y (рис. 2).

По отношению к осям X, Y напряжения обозначим $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$, а деформации $\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy}$.

Тогда связь между компонентами напряжений $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ и деформаций $\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy}$ определяется обобщенным законом Гука для ортотропного материала / 7 /

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_x = \frac{1}{E_x} \sigma_x - \frac{\nu_{xy}}{E_y} \sigma_y, \\ \varepsilon_y = -\frac{\nu_{yx}}{E_x} \sigma_x + \frac{1}{E_y} \sigma_y, \\ \gamma_{xy} = \frac{1}{G_{xy}} \tau_{xy}, \end{array} \right. \quad (3.3)$$

где E_x, E_y - модули упругости соответственно вдоль осей X и Y ;

ν_{xy}, ν_{yx} - коэффициенты Пуассона;

G_{xy} - модуль сдвига.

При кручении трубы

$$\sigma_x = 0, \sigma_y = 0, \tau_{xy} \neq 0. \quad (3.4)$$

Тогда из (3.3) получаем

$$\varepsilon_x = 0, \varepsilon_y = 0, \gamma_{xy} = \tau_{xy} / G_{xy}, \quad (3.5)$$

и модуль сдвига определяется по формуле

$$G_{xy} = \tau_{xy} / \gamma_{xy}. \quad (3.6)$$

Таким образом, для определения модуля сдвига G_{xy} необходимо при заданном напряжении τ_{xy} определять сдвиговую деформацию γ_{xy} .

Но тензорезисторы позволяют замерять только продольную деформацию. Поэтому их наклеивают вдоль осей X_1, X_2 , повернутых относительно X, Y на угол $\varphi = 45^\circ$ (рис. 2).

Компоненты деформации относительно осей X_1, X_2 обозначим через $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \gamma_{12}$.

Согласно [7] имеем следующие соотношения связи между $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}$ и $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \gamma_{12}$

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_1 = \varepsilon_x \cos^2 \varphi + \varepsilon_y \sin^2 \varphi + \gamma_{xy} \sin \varphi \cos \varphi, \\ \varepsilon_2 = \varepsilon_x \sin^2 \varphi + \varepsilon_y \cos^2 \varphi - \gamma_{xy} \sin \varphi \cos \varphi, \\ \gamma_{12} = -\varepsilon_x \sin 2\varphi + \varepsilon_y \sin 2\varphi + \gamma_{xy} \cos 2\varphi. \end{array} \right. \quad (3.7)$$

Для деформаций, задаваемых (3.5), при $\varphi = 45^\circ$ получаем

$$\varepsilon_1 = \frac{\gamma_{xy}}{2}, \quad \varepsilon_2 = -\frac{\gamma_{xy}}{2}, \quad \gamma_{12} = 0. \quad (3.8)$$

То есть по отношению к осям X_1, X_2 существуют только продольные деформации ε_1 и ε_2 .

Из (3.8) получаем

$$\gamma_{xy} = 2\varepsilon_1 = 2|\varepsilon_2|. \quad (3.9)$$

Таким образом, замерив деформацию ε_1 или ε_2 , используем формулу (3.9), а затем (3.6) и находим модуль сдвига G_{xy}

$$G_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{\gamma_{xy}} = \frac{\tau_{xy}}{2\varepsilon_1}. \quad (3.10)$$

Образцы и оборудование

Определение модуля сдвига производится на трубчатом стеклопластиковом образце. Трубчатый образец получен намоткой стеклоткани Т-10 (сатиновое плетение), пропитанной эпоксидной композицией, на оправку, с последующим отверждением в прессформе. Основа армирующей ткани направлена вдоль оси образца.

Схема испытательной установки приведена на рисунке 4.

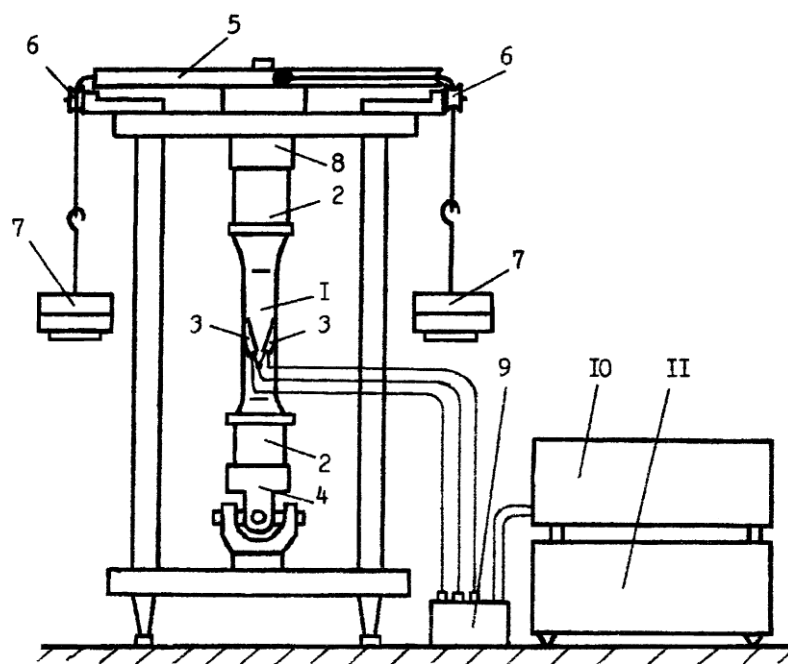


Рис. 4 Схема установки

- 1 – трубчатый образец; 2 – захваты; 3 – активные тензорезисторы;
 4 – шарнир; 5 – диск; 6 – ролики; 7 – грузы; 8 – подшипниковый узел;
 9 – колодка для подключения тензорезисторов; 10 – тензостанция;
 11 – регистрирующий прибор

Образец 1 устанавливается в захваты 2 цангового типа на

дисковом нагружающем устройстве, которое позволяет проводить испытания на кручение. В цепи нагружения установлен шарнир Гука 4 для устранения влияния изгибающих моментов.

Верхний захват образца крепится к валу, установленному в подшипниковом узле 8, воспринимающем продольные и поперечные нагрузки. На свободном конце вала закреплен диск 5, посредством которого на образце создается крутящий момент. На диск 5 действует пара сил, передаваемая с помощью мягких тросиков и роликов 6 от пары грузов 7. Точки приложения пары сил лежат на концах диаметра диска. Диаметр диска равен 602 мм.

На наружной поверхности образца под углами $\pm 45^\circ$ к направлению основы армирующей ткани, а следовательно, к оси образца наклеены два тензорезистора 3. Тензорезисторы соединены между собой по схеме полумоста и подключены к колодке 9. Оба тензорезистора в измерительной схеме являются активными. При кручении образца один из них работает на растяжение, а другой на сжатие. Колодка 9 соединена кабелями с тензоаппаратурой 10, сигналы с которой поступают на регистрирующий прибор 11.

При проведении работы может применяться либо тензоусилитель ТА-5, либо тензоаппаратура 8АНЧ-23.

Схема подключения тензорезисторов к тензоаппаратуре 8АНЧ-23 приведена на рисунке 5. В этом случае колодка 9 содержит согласующий трансформатор, клеммы для подключения тензорезисторов и кабельные разъемы.

Порядок проведения лабораторной работы и обработки результатов

Трубчатый образец устанавливается на дисковом нагружающем устройстве (рис. 4).

Тензорезисторы подключаются к тензостанции (рис. 5).

Устанавливаются необходимые пределы измерения на тензоаппаратуре и регистрирующем приборе.

Нагружение образцов - ступенчатое, с равными интервалами нагрузки, осуществляется одновременной установкой двух грузов одинакового веса на два грузоприемника нагружающего устройства (рис. 4). Рекомендуется осуществить 5 - 6 ступеней нагружения. Максимальная величина крутящего момента при определении модуля

сдвига не должна превышать 20 % от разрушающего момента при кручении.

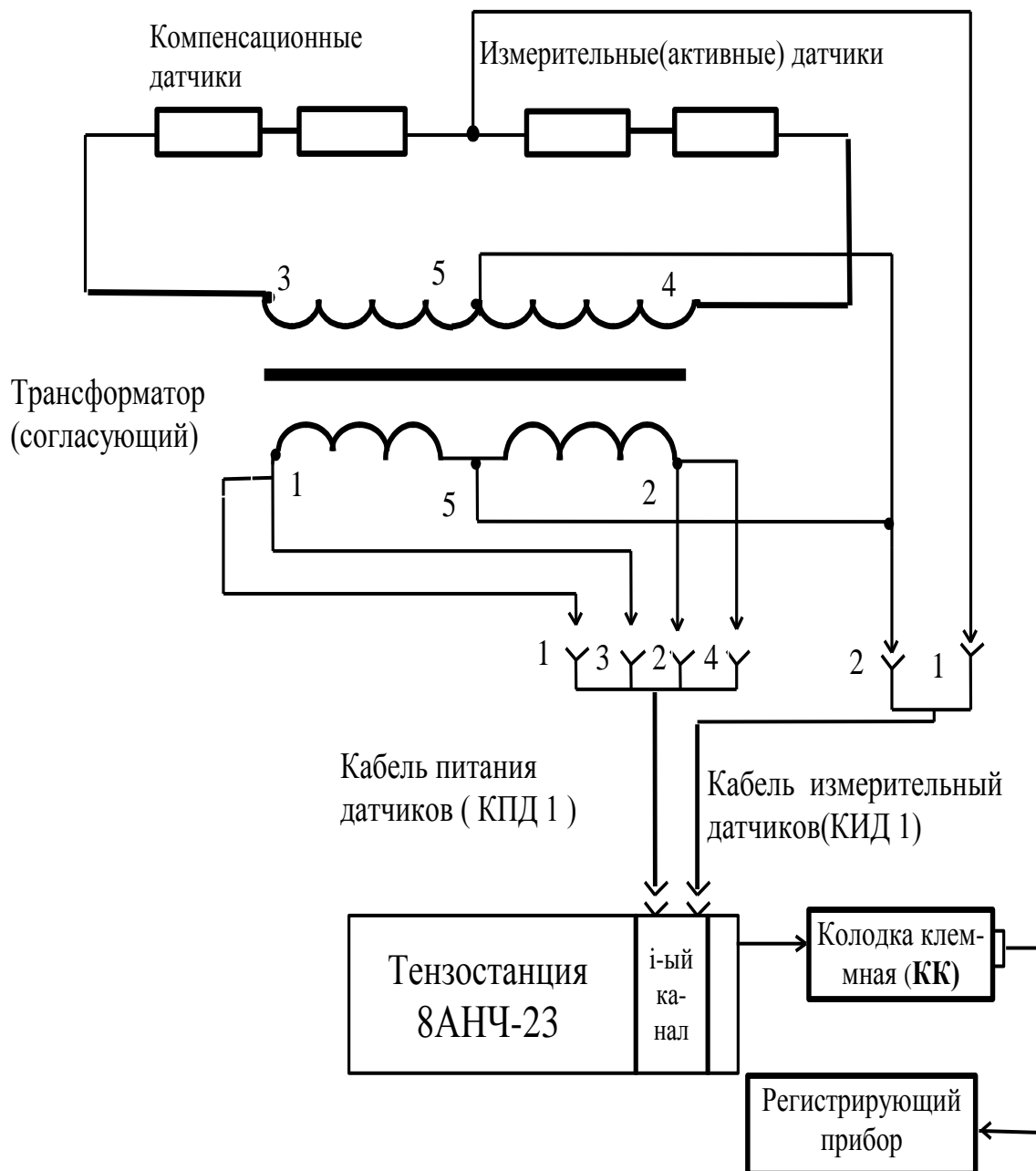


Рис. 5 Схема подключения измерительной аппаратуры

Определение модуля сдвига при кручении основано на измерении тензорезисторами относительной деформации на поверхности образца в направлениях под углом 45° к оси вращения (рис. 4).

Сигнал с тензорезисторов усиливается тензоусилителями ТА-5 или 8АНЧ-23 и регистрируется на цифровом вольтметре.

Значения деформации при использовании тензоусилителя ТА-5 определяются по формуле

$$\varepsilon = \frac{2\varepsilon_k A_i}{s_T A_k} \quad [\text{отн. ед.}] , \quad (3.11)$$

где A_i – показания регистратора при отсчете измеряемого сигнала;

ε_k – предел измерения тензоусилителя в относительных единицах;

s_T – коэффициент чувствительности тензорезистора;

$A_k = A_k' - A_0$ при обозначениях:

A_k' – показания регистратора при отсчете контрольного сигнала в режиме “К”;

A_0 – показания регистратора при отсчете контрольного сигнала в режиме “0”.

Формулу (3.11) представим в виде

$$\varepsilon = K_\varepsilon A_i \quad [\text{отн.ед.}] , \quad (3.12)$$

где

$$K_\varepsilon = \frac{2\varepsilon_k}{s_T A_k} . \quad (3.13)$$

Значения деформации при использовании тензоаппаратуры 8АНЧ-23 определяются по формуле

$$\varepsilon = 2.83 \frac{4A_i K}{A_k \Pi s_T K_D} \varepsilon_k \quad [\text{отн. ед.}] , \quad (3.14)$$

где $A_i = A_i' - A_o'$,

A_i' – показания регистратора при текущем значении измеряемого сигнала;

A_o' – показания регистратора при начальном значении измеряемого сигнала;

ε_k – значения калибровочной деформации ($\varepsilon_k = 0.25 \cdot 10^{-3}$);

K – коэффициент, определяемый маркировкой предела, на котором проводилось измерение;

s_T – коэффициент чувствительности тензорезисторов ($s_T = 2.16$);

Π – число активных плеч моста ($\Pi = 2$);

K_D – значение дополнительного коэффициента усиления при работе в режиме “Ст-Дин $K \geq 1$ ” и “Дин” ($K_D = 1$);

$$A_k = A'_k - A_o,$$

A'_k, A_o – показания регистратора при отсчете контрольных сигналов в режимах “калибр” и “0”.

По аналогии с (3.12) формулу (3.14) представим в виде

$$\varepsilon = K_\varepsilon A_i [\text{отн.ед.}], \quad (3.15)$$

где

$$K_\varepsilon = 2,83 \frac{4K}{A_k \Pi s_T K_D} \varepsilon_k. \quad (3.16)$$

В ходе испытаний для конкретного тензоусилителя определяются значения коэффициентов A'_o, K_ε , на основе которых в таблице 1 определяются значения угла сдвига для различных напряжений.

Затем, в координатах $\tau \sim \gamma_{xy}$ по точкам, соответствующим ступеням нагружения, строится диаграмма деформирования образца.

На диаграмме выбирается прямолинейный участок и определяется модуль сдвига по формуле

$$G_{xy} \approx \frac{\tau_2 - \tau_1}{\gamma_{xy}^2 - \gamma_{xy}^1}, \quad (3.17)$$

где τ_2 и γ_{xy}^2 – касательные напряжение и сдвиговая деформация, соответствующие концу участка;

τ_1 и γ_{xy}^1 – касательные напряжение и сдвиговая деформация, соответствующие началу участка.

Требования к отчету

Отчет должен отражать цель работы, содержать краткое описание испытательного оборудования и образцов, включать основные положения методики проведения экспериментов и обработки результатов.

Особое внимание следует уделить правильности внесения в отчет данных экспериментов и получаемых на их основе результатов.

В отчете должны быть представлены выводы.

Контрольные вопросы

1. Какой вид нагружения реализуется при определении модуля сдвига на трубчатых образцах?
2. Каким выражением определяется напряжение сдвига на поверхности трубчатого образца?
3. Как нагружается трубчатый образец при кручении?
4. Чем измеряются деформации на поверхности трубчатого образца?
5. Какую форму имеет закон Гука при сдвиге?
6. По какой формуле определяется модуль сдвига?

Таблица 1

i	$P_i,$ Н	$M_y=2PR,$ Н·м	$\tau_{\max}=M_y/W_p,$ МПа	$A_i^1,$ В	$A_i=A_i^1-A_0^1,$ В	$\varepsilon_i=K_\varepsilon A_i$	$\gamma_{xy}^{(i)}=2\varepsilon_i$	$G_{xy}=\tau_{\max} / \gamma_{xy}^{(i)},$ МПа

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ИСПЫТАНИЕ КОМПОЗИТНЫХ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ИЗГИБ

Цель работы

Экспериментальное изучение метода испытания образцов из композитных материалов на изгиб.

Определение модуля упругости при трехточечном поперечном изгибе.

Краткие теоретические сведения

Рассчитывая на жесткость при изгибе элементы конструкций из КМ, необходимо знать модуль упругости при изгибе. Для изотропных материалов модуль упругости при изгибе практически совпадает с продольным. Для слоистых КМ модуль упругости при изгибе, как правило, меньше продольного модуля упругости. Причина в том, что прогиб при поперечном изгибе слоистого пластика складывается из прогиба от изгибающего момента и прогиба, вызванного сдвиговыми деформациями от касательных межслойных напряжений. Поэтому, определяя прогиб слоистого элемента при поперечном трехточечном изгибе, необходимо использовать соответствующий модуль упругости.

Модуль упругости при изгибе E_{ni} (Па), вычисляется по формуле

$$E_{ni} = \frac{\Delta F \ell^3}{4bh^3 \Delta \omega}, \quad (4.1)$$

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).

Предел прочности при поперечном трехточечном изгибе $\sigma_{nчи}$ (Па) вычисляют по формуле

$$\sigma_{nчи} = \frac{M_u^{\max}}{W_x},$$

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

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

Тогда

$$\sigma_{nчи} = \frac{1,5 F_{\max} \ell}{bh^2}, \quad (4.2)$$

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

Для определения максимальных разрушающих напряжений и модуля упругости используют плоский образец прямоугольного сечения. Форма и размеры образца указаны на рисунке 1.

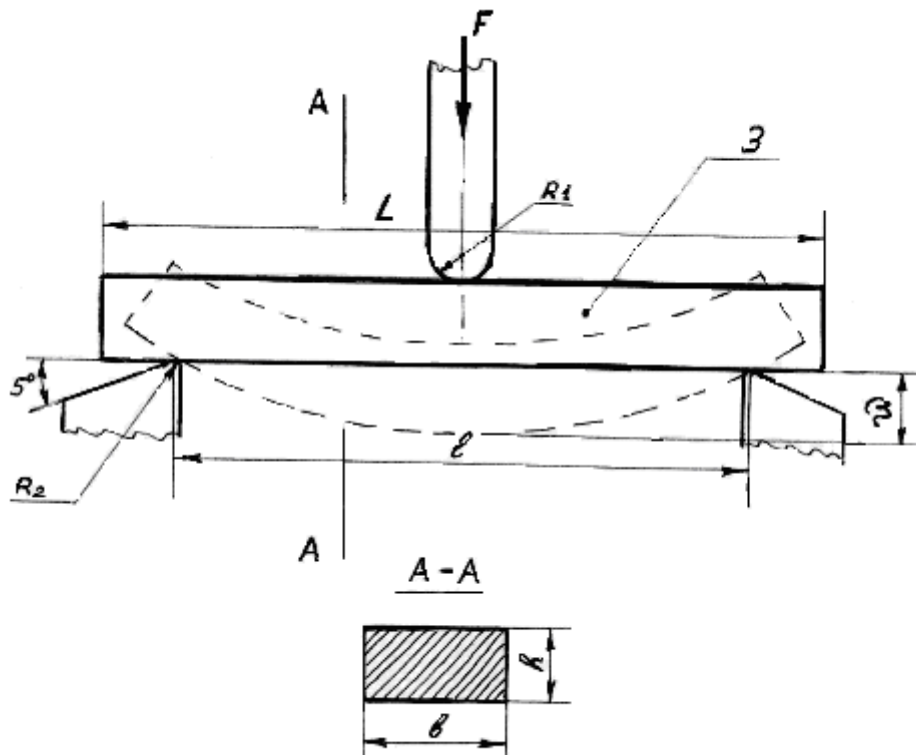


Рис. 1. Образец и схема испытания

Образцы формуют или вырезают из плит в направлении главных осей ортотропии материала. Расположение арматуры должно быть симметрично относительно срединной плоскости образца,

проходящей через его ось и параллельной плоскости укладки арматуры.

Образцы должны иметь гладкую, ровную поверхность, не грубее $Ra = 20\text{мкм}$ по ГОСТ2789-73, без вздутий, сколов, трещин, расслоений и других дефектов, заметных невооруженным глазом.

Отклонение образцов от номинальных размеров по ширине и толщине не должно превышать 0,05мм.

Задание

Провести испытание образца из слоистого пластика на трехточечный изгиб:

- Определить модуль упругости материала образца при изгибе.
- Определить предел прочности материала образца при изгибе.
- Составить отчет по результатам выполнения лабораторной работы.

Методические указания по выполнению задания и обработке результатов эксперимента.

Используемое оборудование

Работа выполняется на аппарате для испытания пластмасс на изгиб. Тип *AS-102/MH-1/*, Венгерского производства, обеспечивающего: нагружение на изгиб с заданной постоянной скоростью, измерение нагрузки с погрешностью не более 1% от измеряемой величины, возможность регулирования скорости нагружения образца.

Схема нагружения изображена на рисунке 1. В середине образца, помещенного на две опоры, прилагается постоянно возрастающая нагрузка. В момент разрушения определяются действующее усилие и прогиб.

Конструкция аппарата изображена на рисунке 2. Нагрузочное устройство (1), предметный стол (2), опорные колонны (4), силоизмерительное устройство (5) измеритель прогиба /устанавливается отдельно/(6).

Работа аппарата

Масляный насос (8), приводимый в действие электродвигателем (7), подает масло в цилиндр (9). При этом поршень (10) перемещается. К штоку поршня прикреплен предметный стол (2), на опоры (11) которого устанавливается образец (3). При

соприкосновении образца с нажимной головкой (12) начинается испытание на изгиб. Под действием силы, возникающей при нажатии нажимной головки на образец, образец прогибается, а нажимная головка своим другим концом отклоняет маятник (13). Величина прогиба определяется показаниями измерителя (6), установленного на нажимной головке. Силоизмерительное устройство (5) показывает мгновенное нагрузочное усилие следующим образом: маятник (13) перемещает рейку (14), рейка при этом вращает шестерню (15), с закрепленной с ней на одной оси стрелкой,двигающейся по круговой шкале. Путь рейки изменяется линейно в зависимости от усилия. Деление круговой шкалы равномерное.

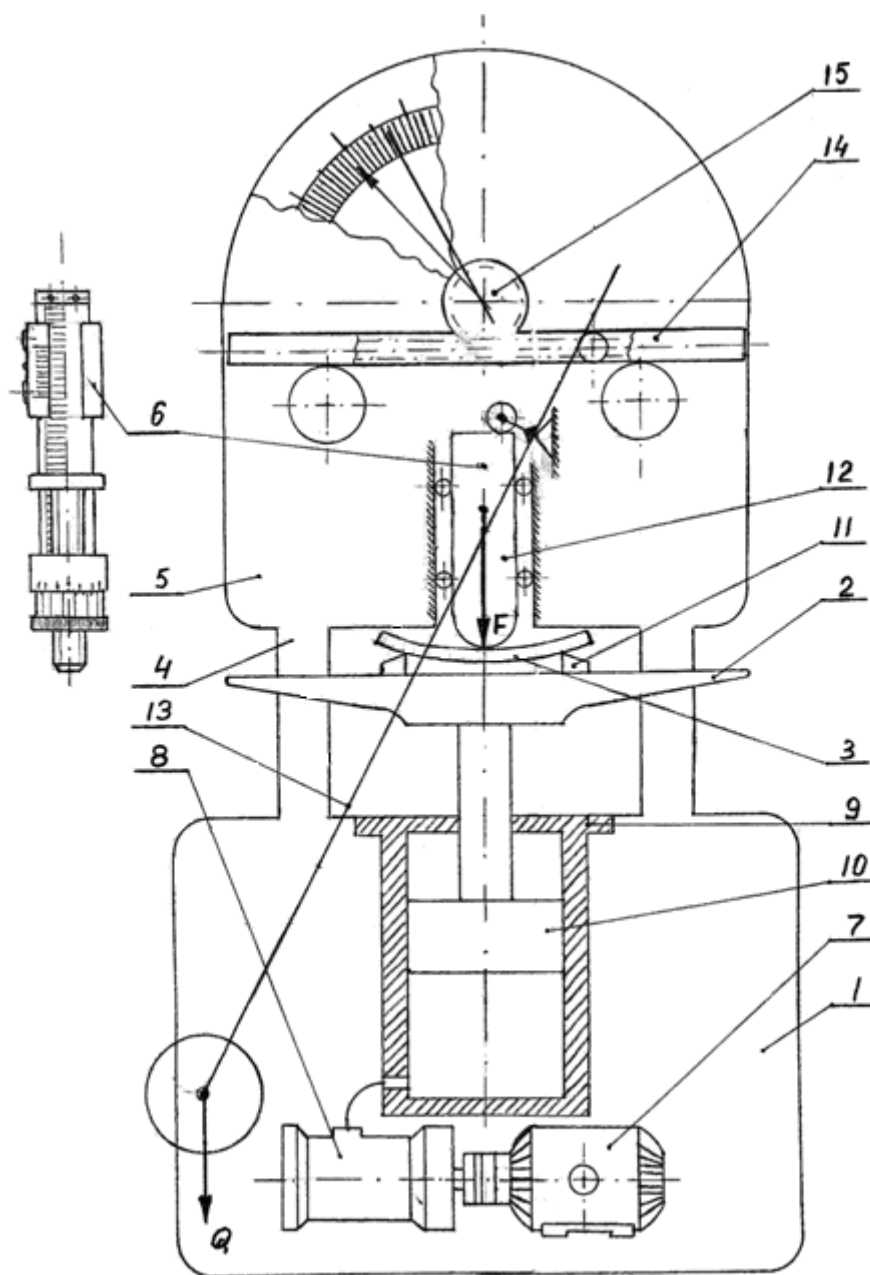


Рис. 2. Конструкция аппарата

Технические данные: пределы измерения 100-500Н (10-50кг),
точность силоизмерителя $\pm 1\%$,
максимально измеряемый прогиб 20мм,
наибольшая толщина образца 45мм,
расстояние между опорами 20-300мм,
скорость хода предметного стола 6-360мм/сек,
 R_1 радиус нажимной головки (12) – 4мм,
 R_2 радиус опоры (11) – 1мм,
ход стола вниз быстрый, без регулирования скорости.

При разрушении образца маятник под действием гидравлического тормоза возвращается в исходное положение плавно, без колебаний.

Измеритель прогиба:

точность отсчета прогиба – 1/20мм,

точность шкалы учета толщины образца – 1/10мм.

Корпус измерителя устанавливается на нажимную головку. Рейка сохраняет достигнутое положение за счет трения. Перемещается от рычага в предметном столе. В момент разрушения образца рычаг падает. Перед следующим измерением рычаг поднимается рукой.

Панель управления аппарата (рис. 3):

кнопки «пуск», «стоп» и тумблер подачи общего питания (16),

кран реверса «вверх» с нагрузкой «вниз» быстро (17),

кран регулирования скорости хода стола вверх (18),

кнопка «стоп», в центре панели управления, для мгновенной остановки поршня (во время нажатия этой кнопки поршень не меняет своего положения) (19).

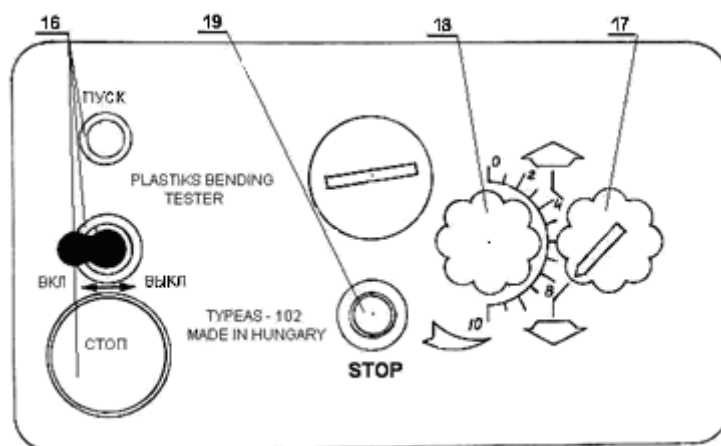


Рис. 3. Панель управления

Проведение испытания

Перед испытанием проводят нумерацию образцов краской или мягким карандашом. Измеряют толщину образца с погрешностью не более 0,05мм и ширину с погрешностью не более 0,01мм в трех местах его рабочей части. Определяют средние арифметические значения толщины и ширины образца и результаты записывают в протокол испытаний.

На прогибомере устанавливают замеренную толщину образца, затем язычок рейки оттягивают вниз до отказа.

На аппарате устанавливаются нажимная головка и опоры. Рычаг, перемещающий язычок рейки, поднимается в горизонтальное положение.

Расстояние между опорами ℓ устанавливается равным $40h \pm 1,0$ мм и измеряется с погрешностью не более 0,2мм.

Образец устанавливается на опоры так, чтобы его ось и продольная ось предметного стола были параллельны.

Испытания проводятся при комнатной температуре $20 \pm 2^\circ\text{C}$. Включается тумблер, подающий общее питание. Затем кран реверса устанавливается в положение «вверх». Краном регулятором скорости устанавливается предварительная скорость стола и кнопкой «пуск» включается двигатель насоса.

Скорость приложения нагрузки устанавливается опытным путем $5 \div 20$ мм/мин (в зависимости от свойств испытуемого материала).

При определении модуля упругости нагружают образец с постоянной скоростью по ступенчатой схеме. Величины нагрузок и, соответствующих им прогибов, при каждой ступени нагружения заносятся в таблицу 1. Число ступеней нагружения должно быть не менее четырех, через $5 \div 10\%$ от максимальной нагрузки, предшествующей разрушению образца. Предельная нагрузка не должна превышать 50% от разрушающей. При отклонении диаграммы от линейной испытания прекращают, образец разгружают.

При определении предела прочности записывают в таблицу 2 максимальную нагрузку, предшествующую разрушению.

Обработка результатов испытаний

Определение модуля упругости выполняется по формуле 4.1. Используя данные таблицы 1 строится диаграмма деформирования. Значение модуля упругости осредняется.

$$\bar{E}_{ui} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_{ui} = \dots \text{Па}$$

Определение предела прочности выполняется по формуле 4.2, с использованием данных из таблицы 2. Для получения значения, соответствующего действительности с достаточной степенью точности, количество испытанных образцов должно быть не менее пяти. Затем находится среднее статистическое значение предела прочности для конкретного материала.

Таблица 1

№	b	h	ℓ	Δ_F	Прирост прогиба	E_{ui}
					$\Delta\omega$	
					м	
1						
2						
3						

Таблица 2

№	b	h	ℓ	F_{\max}	Вид разрушения; продольное расслоение или поперечное разрушение	$\sigma_{пчи}$
	м			Н		
1						
2						
3						

Контрольные вопросы

Что такое модуль упругости слоистого пластика при поперечном трехточечном изгибе?

Какие допущения принимаются при проведении испытаний на трехточечный поперечный изгиб?

Что такое предел прочности при поперечном трехточечном изгибе?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

ИСПЫТАНИЕ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА МЕЖСЛОЙНЫЙ СДВИГ

Цель работы

Экспериментальное изучение метода испытания слоистых и волокнистых композиционных материалов, направленного на получение прочностных характеристик при межслойном сдвиге.

Определение модуля сдвига и предела прочности сдвига при растяжении для образца из слоистого композиционного материала (рис. 1).

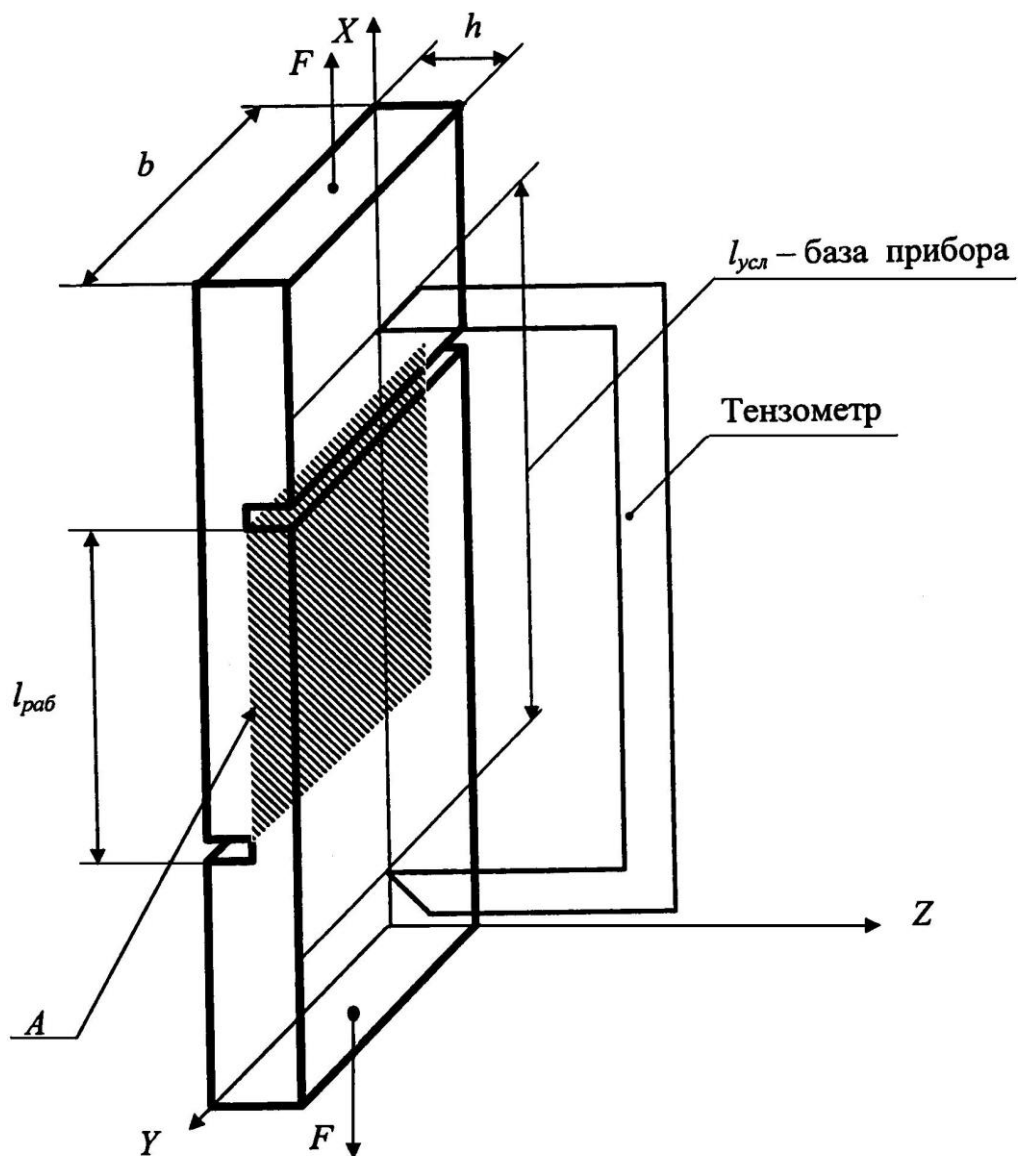


Рис. 1. Схема нагружения и основные размеры образца

Краткие теоретические сведения

Испытание на межслойный сдвиг при растяжении проводится на образце в виде бруска с надрезами. Расчетное сечение образца – A находится между надрезами, параллельно его продольной оси.

У материала такого образца касательное напряжение определяется по формуле

$$\tau = \frac{F}{A}, \quad (5.1)$$

где F – прилагаемая нагрузка, а A – площадь расчетного сечения.

Экспериментально установлено, что оптимальные размеры образца должны иметь следующие значения:

- h – 3 мм,
- b – 25 мм,
- l – 13 мм.

Использование образцов с такими геометрическими параметрами дает возможность сделать определенные допущения по исключению влияния изгиба и возникающей концентрации касательных напряжений. Кроме того, делаются еще допущения следующего содержания: межслойный сдвиг происходит вследствие перекашивания слоя связующего, заключенного между двумя слоями арматур; толщина арматуры мала и практически не оказывает сопротивление перекашиванию слоя связующего; величина смещения – Δ , измеряемая в процессе испытаний, складывается из деформации растяжения – Δl_p и смещения – Δl_c .

Условный модуль межслойного сдвига с учетом принятых допущений определяется по формуле

$$G_m = \frac{\Delta F}{l_{\text{раб}} b \Delta \gamma_m}, \quad (5.2)$$

где ΔF – приращение нагрузки; $\Delta \gamma = \frac{\Delta l_c}{h_1}$ – среднее приращение деформации сдвига, соответствующее приращению нагрузки ΔF ;

$$\Delta l_c = \Delta - \Delta l_p = \Delta - \frac{\Delta F l_{\text{усл}}}{b h E}; \quad (5.3)$$

$$h_1 = \frac{h}{n}; \quad (5.4)$$

где h_1 – средняя толщина одного слоя связующего; h – толщина образца; n – количество слоев арматуры в образце; b – ширина образца; l_{ysl} – база прибора, измеряющего деформацию; l_{pab} – длина рабочей части образца; E – модуль упругости материала образца при растяжении.

Предел прочности сдвига при растяжении образца с надрезами, изготовленного из слоистого композиционного материала определяется по формуле

$$\tau_{nc} = \frac{F_{\max}}{A}, \quad (5.5)$$

где τ_{nc} – касательное напряжение разрушения (предел прочности); A – площадь среза (для нашего образца $A = bl_{pab}$).

Задание

Провести испытание на растяжение плоского образца с надрезами из слоистого композиционного материала. Определить условный модуль межслойного сдвига. Определить предел прочности сдвига при растяжении. Составить отчет по результатам выполненной работы.

Методическое указание по выполнению задания и обработке результатов эксперимента. Используемое оборудование

Перед началом работы производится обмер образцов, маркировка их с помощью краски или мягкого карандаша, и выполняется эскиз по образцу рисунка 1.

При измерениях определяются фактические величины следующих параметров: h – толщина образца; b – ширина образца; l_{pab} – длина рабочей части образца.

Метод измерения деформации

На готовый к испытанию образец устанавливается тензометр. Расстояние между концами измерительных щупов тензометра и есть l_{ysl} – база прибора.

Тензометр представляет собой прибор, преобразующий механическое перемещение наконечника щупа в электрический сигнал.

Образец с тензометром устанавливается в захваты испытательной машины. Скорость перемещения траверсы машины должна быть около 2,5 мм/мин.

Проведение испытаний

Перед включением машины обнуляются показания тензометра.

Испытательная машина включается и производится нагружение – $F_{предв} \approx 100$ Н.

В этом положении машина останавливается, и производятся записи фактических показаний тензометра по перемещению и показания машины по нагрузке.

Такое предварительное нагружение производится для того, чтобы выбрать все зазоры в захватах и механизмах испытательной машины.

Далее машина включается и производится нагружение $F_{упр} \approx 1000$ Н.

По достижении указанной нагрузки машина останавливается и производится повторная запись показаний перемещения и нагрузки.

Полученных данных достаточно для вычисления значения G_m – условного модуля межслойного сдвига по формуле (5.2).

Затем тензометр демонтируется с образца. Машину включают и производят нагружение до разрушения образца. Измеренная при разрушении нагрузка – F_{max} и даст возможность определить предел прочности сдвига τ_{nc} по формуле (5.5).

Для получения расчетных значений, близких к реальным с достаточной степенью точности, количество испытанных образцов должно быть не менее пяти. После окончания испытаний по формулам (5.7) и (5.8) определяют средние статистические значения характеристик материала образцов

$$\bar{G}_{усл} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n G_{усл\ i} = \dots\dots\dots (\text{Па}) \quad (5.7)$$

$$\bar{\tau}_{nc} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tau_{nc\ i} = \dots\dots\dots (\text{Па}) \quad (5.8)$$

Обработка результатов испытаний

Все данные, полученные при испытаниях, заносятся в таблицу 1. Затем производятся расчеты по формулам (5.2–5.6). Результаты также

проставляются в таблицу 1, и определяются средние статистические значения расчетных величин по формулам (5.7, 5.8).

Таблица 1

№	h	b	$l_{\text{раб}}$	A	$l_{\text{усл}}$	$F_{\text{предв}}$	$F_{\text{упр}}$	Δ	G_m	F_{max}	$\tau_{\text{нч}}$
n	м	м	м	м ²	м	Н	Н	м	Па	Н	Па
1											
2											
3											
4											
5											

Контрольные вопросы

Почему модуль упругости при сдвиге G для композитных материалов со слоистой структурой, определяемый в настоящей лабораторной работе, называется условным?

Какие факторы являются определяющими для величины предела прочности $\tau_{\text{нч}}$ композиционного материала со слоистой структурой при сдвиге?

Для чего необходимо предварительное нагружение в процессе проведения испытаний?

Что является определяющим для величины модуля упругости при сдвиге композиционного материала со слоистой структурой?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

ИСПЫТАНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ОДНОСТОРОННЕМ НАГРЕВЕ

Цель работы

Целью данной работы является изучение методов:

- определения температурного поля по толщине модельного образца из теплозащитного композиционного материала при действии одностороннего нагрева;
- определения сил, возникающих в жесткозащемленном стержне при одностороннем нагреве;
- определения глубины прококсованного слоя.

Теоретическая часть

Композиционные волокнистые полимерные материалы нашли широкое применение в качестве теплозащитных покрытий спускаемых космических аппаратов. На сегодняшний день они являются практически единственным классом материалов способным воспринимать высокие тепловые нагрузки одновременно являясь несущими элементами конструкции.

Теплозащитные свойства КМ определяются целым рядом факторов.

Во-первых, они обладают низким коэффициентом теплопроводности, во-вторых, при действии высоких температур в связующем происходит физико-химические явления, на протекание которых затрачивается значительная часть падающего теплового потока, в-третьих - в результате коксообразования, на поверхности формируется композит более стойкий к действию температуры, чем исходный материал, в-четвертых - при деструкции связующего возникает значительное количество газов, которые при выходе на поверхность, охлаждают поверхностные слои.

Являясь эффективным средством тепловой защиты элементов конструкций, теплозащитное покрытие должно выполнять одновременно и конструкционные функции.

При воздействии высоких температур в теплозащитном покрытии возникает сильно неоднородное поле температур, появляются

значительные тепловые деформации, которые вызывают температурные напряжения. Величина температурных напряжений достигает значений, могущих вызвать разрушение крепления теплозащитного покрытия или нарушение его сплошности. Природа этих напряжений связана с тепловыми деформациями, которые возникают в теплозащитном покрытии при действии высоких температур.

На рисунке 1 представлены графики изменения температур в различных слоях теплозащитного покрытия при одностороннем тепловом воздействии и последующем охлаждении.

Тепловой поток воспринимается наружной поверхностью ($x = 0$). Как видно из рисунка 1, каждый слой имеет свой режим теплового нагружения. Наибольшее тепловое воздействие испытывает слой, обращенный к внешнему тепловому потоку.

Тепловое деформирование материала теплозащитного покрытия при действии высоких температур имеет сложную природу. При температурах, не превышающих температуры деструкции (до 250°C), наблюдается обычное тепловое расширение, сопровождающееся улетучиванием влаги из композиционного материала, которая несколько снижает тепловую деформацию. При температурах деструкции и выше в связующем и частично в наполнителе происходят физико-химические превращения, которые вызывают усадку. Величина усадки зависит как от температуры, так и времени ее воздействия и может значительно превышать тепловое расширение.

На рисунке 1 представлены зависимости тепловой деформации теплозащитного покрытия на основе кремнеземной ткани КТ-11 и фенолформальдегидного связующего для различных режимов тепловых воздействий.

Теоретический расчет температурных напряжений в теплозащитном покрытии из КМ при нестационарных и неоднородных по толщине покрытиях представляет большие трудности, вызванные тем, что в каждом слое ТЗП под действием высокой температуры происходят структурно-фазовые превращения, приводящие к тому, что мы имеем в каждый момент времени материал с изменяющимися упругими, прочностными, теплофизическими, реологическими свойствами. А если учесть, что эти свойства в каждом слое зависят от всей истории теплового воздействия, то возникают большие трудности в определении этих свойств в каждый момент времени. Да

и сама физическая модель существенно отличается от традиционной упругой.

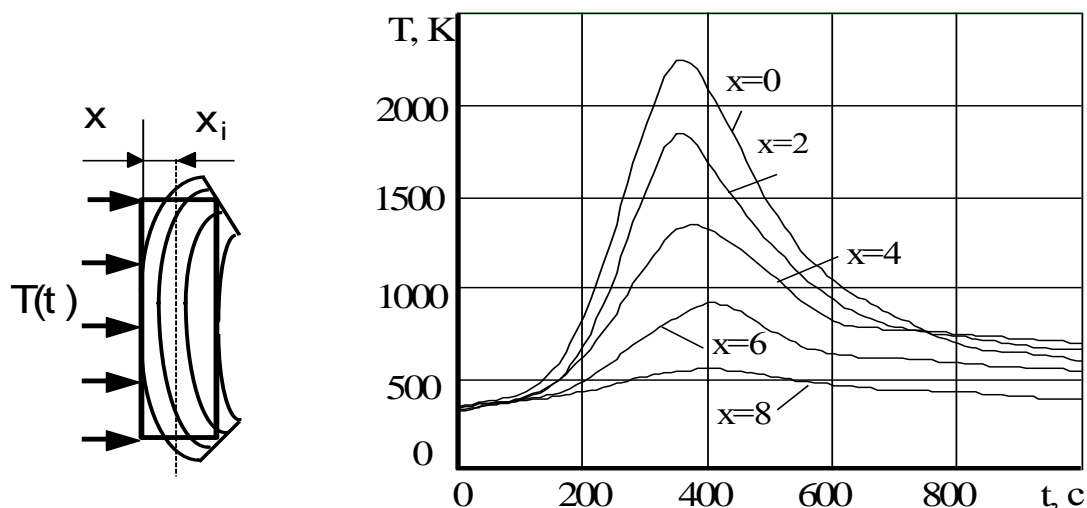


Рис. 1. Зависимость температуры в различных слоях теплозащитного покрытия из стеклопластика на основе кремнеземного трикотажа и фенолформальдегидной смолы (начало координат совмещено с нагреваемой поверхностью)

Все это вызывает большие математические и методологические трудности в определении напряжено-деформированного состояния ТЗМ в условиях одностороннего нагрева. Поэтому ниже рассматривается экспериментальный метод определения результирующих сил и изгибающих моментов в жесткозащемленном стержне. Одновременно определяется изменение температурного поля по толщине модельного образца ТЗМ при программном одностороннем нагреве.

Полученные результаты позволяют определить усилия, возникающие в местах крепления ТЗМ и дать оценку прочности крепления ТЗМ к защищаемому объекту.

Образцы и оборудование

На рисунке 2 представлена упрощенная схема установки для испытаний образцов из теплозащитных материалов при лучистом одностороннем нагреве. Установка предназначена для определения продольных усилий и изгибающих моментов, а также градиента

температуры по толщине, возникающих в элементах конструкций теплозащиты в нестационарных условиях одностороннего нагрева.

Образец 1 из теплозащитного материала установлен в захватах установки таким образом, чтобы его продольная центральная ось (проходящая через центры поперечных сечений) совпадала с осью установки. Один захват является неподвижным, а другой - подвижным, соединенным с подвижной стойкой 8.

Подвижная стойка опирается нижней частью на стальной шарик и имеет в плоскости чертежа две степени свободы: возможно поступательное движение вдоль оси установки и поворот относительно опоры.

С подвижной стойкой жестко связаны два силовых упругих элемента 13 с наклеенными на них тензорезисторами 12. Кроме того упругие элементы 13 через передачи типа "винт-гайка" связаны с неподвижной стойкой 9, на которой располагаются индикаторы перемещений часового типа 10 и штурвалы 11 передачи "винт-гайка". Упругие элементы предназначены для восприятия и измерения нагрузки от образца.

Односторонний нагрев образцов производится в основном за счет лучистой энергии, получаемой от специального водоохлаждаемого нагревателя 2, основным элементом которого являются кварцевые лампы (КГ-1000) 4 мощностью 1000 Вт каждая и зеркальный отражатель 3. Нагреватель расположен на расстоянии 8-10 мм от нагреваемой поверхности и обеспечивает нагрев поверхности образца плоскопараллельным тепловым потоком q до температуры 1000°C . Максимальная скорость подъема температуры на нагреваемой поверхности составляет 100 град / с.

Для определения температурного режима эксперимента на нагреваемой и ненагреваемой поверхностях образца устанавливаются термопары 5 и 7 соответственно. При необходимости определения температуры внутри образца (в его центре) может быть установлена термопара 6, для чего через боковую поверхность до центра поперечного сечения образца перпендикулярно направлению теплового потока высверливается небольшое отверстие. Тип применяемых термопар: хромель-алюмель (ХА). Диаметр термопарных проводов 0,2 мм. Термопары 5, 6, 7 соединены с многоточечным самопишущим автоматическим потенциометром (КСП-4) 14, позволяющим графически регистрировать температуры на образце в функции времени.

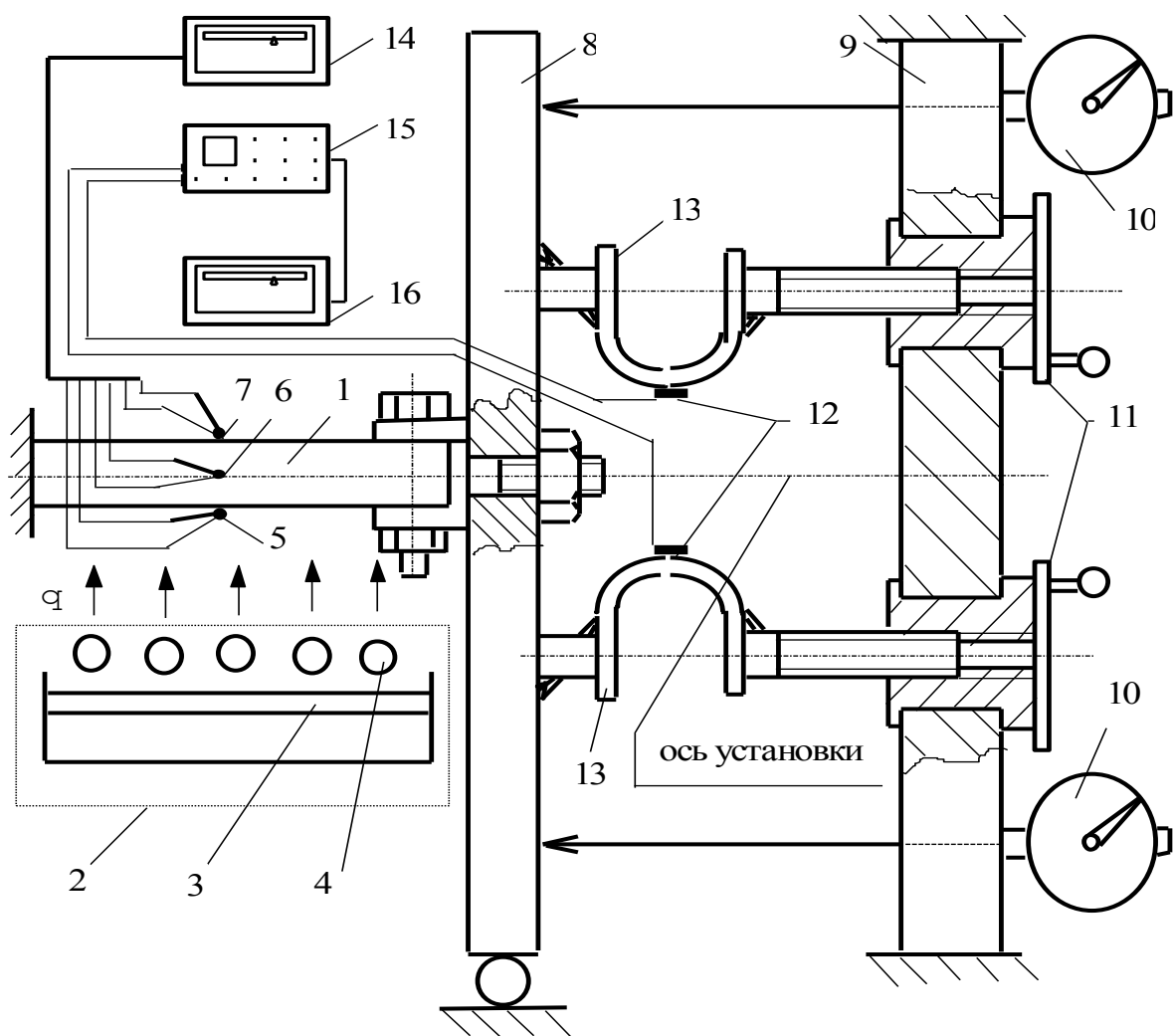


Рис. 2 Упрощенная схема установки для испытаний полимерных композиционных теплозащитных материалов при одностороннем нагреве:

- 1 – образец; 2 – водоохлаждаемое нагревательное устройство;
 3 – отражатель; 4 – кварцевые нагревательные лампы;
 5, 6, 7 – термопары; 8 – подвижная опора; 9 – неподвижная опора;
 10 – индикаторы перемещений часового типа;
 11 – штурвал передачи винт-гайка; 12 – тензодатчики;
 13 – упругий элемент; 14 – потенциометр КСП-4;
 15 – тензоусилитель 8АНЧ; 16 – прибор КСУ-4

Принцип работы установки при измерении усилий, возникающих в образце при одностороннем нагреве заключается в следующем. При нагреве образец изменяет свои длинновые размеры и изгибается. В результате в закрепленном в захватах образце возникают внутренние усилия. Равнодействующие этих усилий (растягивающая или сжимающая нагрузка и изгибающий момент) через подвижную стойку 8, упругие элементы 13 передаются на неподвижную стойку 9. При этом подвижная стойка за счет

податливости упругих элементов перемещается, изменяя показания индикаторов часового типа 10. Вращая вручную штурвалы 11 передачи "винт-гайка" на неподвижной стойке 9 с очень высокой жесткостью увеличивают усилия на упругих элементах, перемещая подвижную стойку в обратном направлении таким образом, чтобы вернуть показания индикаторов 10 к первоначальному значению. В результате подвижная стойка возвращается в свое первоначальное положение. Электрические сигналы о величине усилий с тензорезисторов 12 поступают на тензоусилитель 15 и регистрируются прибором (КСУ-4) 16 в функции времени на диаграммной бумаге. Полученные результаты обрабатывают, представляя в виде зависимостей продольных усилий и изгибающих моментов от времени.

Таким образом, на установке моделируются условия идеально жесткого закрепления образца и при этом определяются возникающие в образце в этих условия внутренние силовые факторы.

На данной установке могут испытываться образцы прямоугольной формы из различных теплозащитных материалов со следующими размерами:

- длиной от 220 до 250 мм;
- шириной от 30 до 50 мм (рекомендуемые размеры);
- толщиной от 2 до 15 мм.

Длина рабочей зоны нагрева на образце составляет 150 мм.

Порядок проведения лабораторной работы и обработка результатов

На испытываемую модель ТЗП устанавливают три термопары: на нагреваемую поверхность, на холодную поверхность и в центре толщины образца.

Термопары желательно расплющить до толщины 0,05 мм. На зачищенную под термопару поверхность наносят тонкий слой клея БФ-2 и приклеивают термопару таким образом, чтобы провода были расположены вдоль образца. Поверхность термопары, обращенной к нагревателю, покрывают тонким слоем (0,05 мм) стеклоткани. Далее на ненагреваемую поверхность образца для предотвращения возгорания наносят тонкий слой асбеста. Образец с наклеенными термопарами выдерживается на открытом воздухе 2 часа, а затем

нагревается в термостате до температуры 70 °С и выдерживается в течение часа.

Подготовленный к испытанию образец устанавливают в захваты установки. Термопары подключают к самопишущему многоотечному прибору КСП-4 (рис. 2).

Режим нагрева обеспечивают по показаниям термопары, закрепленной на нагреваемой поверхности, вручную, либо автоматически с помощью приборов. Для обеспечения граничных условий закрепления образца необходимо перед нагревом установить индикаторы часового типа на 0 и в течение всего времени одностороннего нагрева поддерживать их на этом уровне с помощью маховиков.

Предварительно на диаграммной бумаге КСП-4, предназначенного для регистрации температуры на нагреваемой поверхности образца, наносится режим нагрева (в частном случае линейный со скоростью 160 °С/ мин). Включают односторонний нагрев и с помощью реверсивного исполнительного механизма, автотрансформатора устанавливают заданный на диаграммной бумаге КСП-4 режим нагрева. Максимальная температура нагрева 800 °С. После чего нагрев выключают. В режиме естественного охлаждения продолжают поддерживать граничные условия.

После проведения эксперимента отрезается часть диаграммной ленты с КСУ-4, регистрирующего усилия, возникающие в местах крепления образца. Значения усилий с диаграммы, полученные в процессе нагрева, умножают на тарировочный коэффициент упругих элементов, и заносятся в таблицу протокола испытаний. Полное усилие при соответствующей температуре нагреваемой поверхности, определяется как сумма усилий, регистрируемых упругими элементами. Информация о температурном поле по толщине образца при одностороннем нагреве снимается с диаграммы КСП-4, который регистрирует показания термопар.

Требования к отчету

Отчет должен содержать протокол лабораторной работы, который состоит из следующих пунктов: название и номер работы, цель работы; объект исследования; размеры образца; оборудование, используемое при проведении работы; схема испытания и снимаемая информация; таблица результатов; график усилий.

Особое внимание следует уделить правильности внесения в отчет данных экспериментов. В отчете должны быть представлены выводы. Пример оформления отчета приведен в приложении.

Контрольные вопросы

1. Какие материалы применяются в качестве тепловой защиты летательных аппаратов? Почему?
2. Какие температуры достигаются на поверхности теплозащитного материала?
3. Каким образом измеряются температуры при испытаниях теплозащитных материалов в данной работе?
4. Как измеряются внутренние усилия в элементах теплозащиты в данной работе?
5. Какая регистрирующая аппаратура (приборы) используются в данной работе?

Приложение

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ И УСИЛИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ В ЖЕСТКОЗАЩЕМЛЕННОМ СТЕРЖНЕ ИЗ КОМПОЗИЦИОННОГО ПОЛИМЕРНОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ОДНОСТОРОННЕМ НАГРЕВЕ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ – изучение методов определения температурного поля по толщине модельного образца из теплозащитного композиционного материала при действии одностороннего нагрева; определения сил, возникающих в жесткозащемленном стержне при одностороннем нагреве; определения глубины прококсированного слоя.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ – Модель теплозащитного покрытия в виде полосы из стеклонаполненного композиционного материала на основе кремнеземной пряжи и фенолформальдегидного связующего.

РАЗМЕРЫ ОБРАЗЦА – Пластина $250 \times 50 \times 8$ мм из стеклопластика на основе кремнеземной пряжи и фенолформальдегидного связующего.

ОБОРУДОВАНИЕ, ИСПОЛЬЗУЕМОЕ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РАБОТЫ –

Установка для одностороннего нагрева объекта исследования;

Приборы для регистрации температурного поля КСП-4;

Приборы для регистрации усилий –

тензометрический усилитель 8АНЧ-23 (либо ТА-5);

самопишущие приборы КСУ-4;

термопары ХК $\varnothing 0,2$ мм;

СХЕМА ИСПЫТАНИЯ И СНИМАЕМАЯ ИНФОРМАЦИЯ

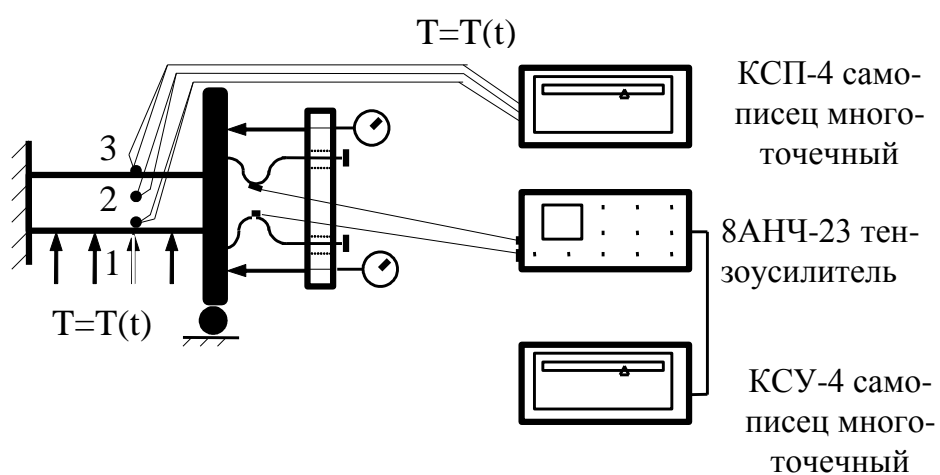
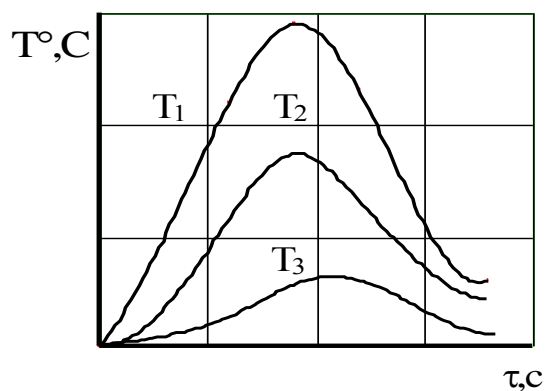


ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ

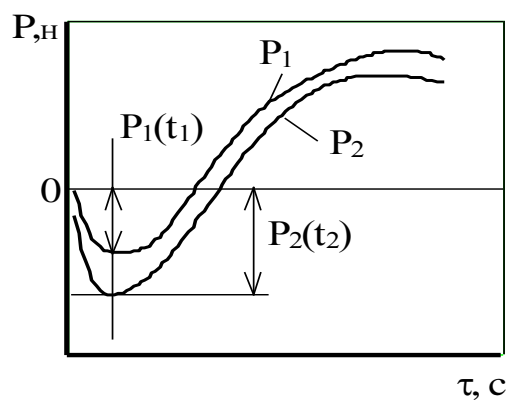
Время τ , с	Тем-ра нагрев. поверх. T_1 , °С	Тем-ра в средн. поверх. T_2 , °С	Тем-ра холодн. поверх. T_3 , °С	Тариро- вочный коэф-т упру- гих эле- ментов k , дел/Н	Показ. верхнег о датчика усилий P_1 , Н	Показ. нижнег о дат- чика усилий P_2 , Н	Продол- ные усилия P , Н

Показания КСП-4



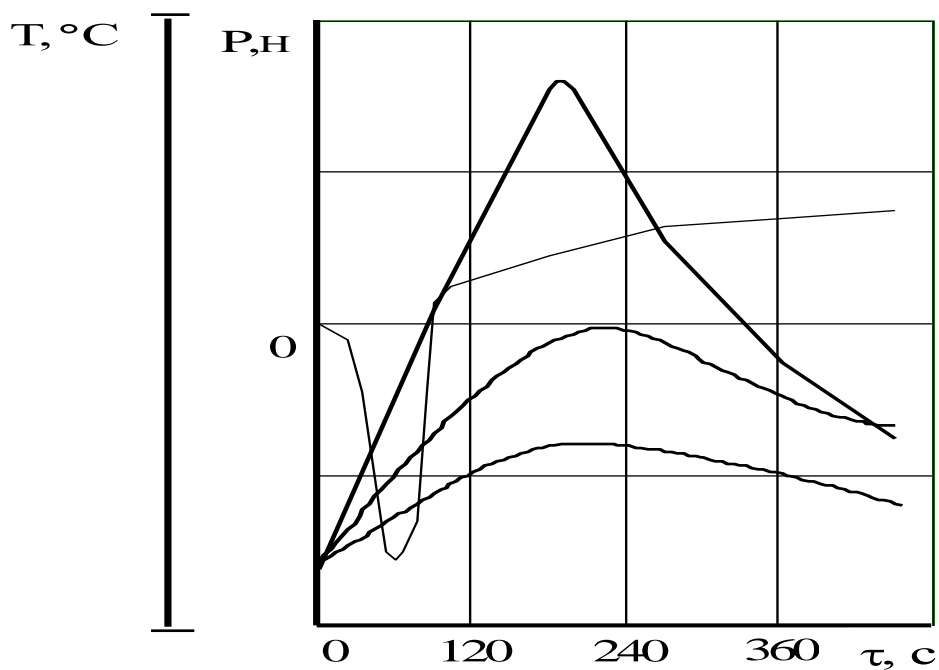
T_1, T_2, T_3 - температуры, регистрируемые термопарами 1.2.3

Показания КСУ-4



$P(t) = P_1(t_1) + P_2(t_2)$,
здесь $P(t)$ - полное усилие в образце, $P_1(t_1)$, $P_2(t_2)$ - усилия, снимаемые с упругих элементов

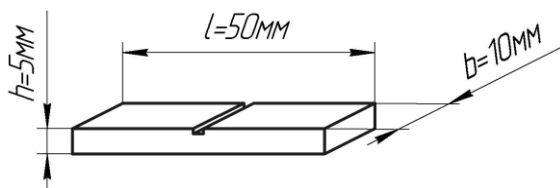
ГРАФИК УСИЛИЯ И ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ



ВЫВОДЫ –

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7. Испытание композиционных материалов на ударную вязкость

- 1 **Цель работы:** Определение ударной вязкости слоистого композиционного материала.
- 2 **Объект исследования:** слоистый композиционный стеклопластик тканой структуры.
- 3 **Испытательное оборудование:** Ударный маятниковый копер типа ТСВ 1,5 (Максимальный запас потенциальной энергии 1,5 кгм = 15 Нм).
- 4 **Образцы для испытаний:** параллелепипед с размерами 50×10×5 мм с надрезом



- 5 **Теоретические сведения:**

$$a = \frac{A_{\text{разр}}}{S},$$

где a - ударная вязкость, $A_{\text{разр}}$ - работа разрушения, S - площадь сечения в месте разрушения.

- 6 **Схема испытания:**

