

УДК 678.057: 620.17:539.37

Օ ԴԵՓՈՐՄԱՑԻՈՆՆՅԱՆ ՏՎՈՅՑՏՎԱԿԱՆ ՏԵԿԼՈՍՏԱՑԻԿԱ  
ՍԻՐԻ ՍՎՈՐՈՐՆՈՒՄ-ՏՏԱՏԻԿԵՍԿՈՄ ՕԴՆՈՍՏՈՒՄ Ի  
ՏԼՈՋՈՒՄ ՆԱԳՐՈՋՆԵՐԻՅԱՆ

Կարապետյան Կ.Ա., Տարկիսյան Ն.Ե., Խուչիկյան Ա.Ն., Ազնաուրյան Ա.Կ.

Կ.Ա.Կարապետյան, Ն.Ե.Սարգսյան, Ա.Ն.Խուչիկյան, Ա.Կ.Ազնաուրյան  
Ապակեպլաստի դեֆորմացիոն հատկությունները կրկնվող-ստատիկ միառանցք և բարդ  
քեղծվածքային ղեպում

Բերվում են կրկնվող-ստատիկ ճգման ենթարկվող ապակեպլաստե քարակապառ  
լատովակների դեֆորմացիոն հատկությունների վրա հաստատուն մեծության ուղղող մամնետի  
ստիպարյան ազդեցության կրկնվածքային հետազոտման արդյունքները: Դիտարկվում է  
նաև կրկնվող-ստատիկ ղեպում հաստատուն ճգող ճիգի ազդեցությանը  
լատովակների դեֆորմացիոն հատկությունների վրա:

K.A.Karapetyan, N.E.Sarkisyan, A.N. Khuchikyan, A.K. Aznauryan

On deformation properties of glass-plastic under repeated-static uniaxial and complicated loading.

Приводятся результаты экспериментального исследования влияния постоянного крутящего момента на деформативные свойства стеклопластиковых труб, подвергнутых повторно-статическому растяжению. Рассматривается также влияние постоянного растягивающего усилия на деформативные свойства труб при их повторно-статическом кручении.

Возрастающие требования к повышению надёжности и долговечности силовых конструкций из композитных материалов выдвигают ряд задач, связанных с построением методов расчёта, учитывающих специфические свойства материала, реальные условия эксплуатации и др. [1,2].

Достоверные сведения о механическом поведении композитов в условиях повторно-статических нагружений необходимы также для уточнения существующих методов оптимального проектирования конструкций.

Отметим, что исследования механических свойств полимерных композитов при повторном нагружении-разгрузке, в основном, были проведены в условиях одноосного напряжённого состояния [3,4 и др.].

В настоящей работе приводятся результаты исследований влияния постоянного крутящего момента на деформационные свойства стеклопластиковых труб, подвергнутых повторно-статическому растяжению. Приводятся также результаты, полученные при испытании труб на циклическое кручение и кручение в условиях постоянно действующего растягивающего усилия.

1. Методика проведения исследований

В качестве опытных образцов использовались трубы с внутренним диаметром 38мм, толщиной стенки 2.25мм и длиной 285мм, изготовленные на основе стекловолоконистой ткани. Направления основы стеклоткани и оси образцов совпадают ( $\varphi = 0^\circ$ ). Подробные сведения о технологии изготовления труб приведены в работе [5].

При циклическом испытании труб на одноосное растяжение (средняя скорость нагружения  $-0.27$  МПа/сек.) и на кручение (средняя скорость нагружения  $-0.1$  МПа/сек.) максимальное значение напряжений составляло  $0,6\sigma_B$  и  $0,3\tau_B$ , соответственно ( $\sigma_B = 147,1$  МПа и  $\tau_B = 47,1$  МПа — временные сопротивления труб при одноосном растяжении и кручении).

При циклическом испытании труб на растяжение в условиях постоянно действующего крутящего момента или на циклическое кручение при наличии постоянного растягивающего усилия величины соответствующих напряжений и режимы испытаний были приняты теми же.

Число циклов при испытаниях принималось равным 12. Для каждого вида испытаний было использовано по 3 образца-близнеца и измерялись как продольные, так и сдвиговые деформации. Максимальный разброс амплитудных и остаточных значений деформаций по отношению к их средней арифметической величине в случае циклического растяжения труб составляет, соответственно  $+2.5$ ;  $-3.6\%$  и  $+5.3$ ;  $-4.2\%$ ; в случае растяжения с кручением  $+3.9$ ;  $-7.1\%$  и  $+6.3$ ;  $-4.1\%$ ; в случае кручения  $+2.6$ ;  $-2.7\%$  и  $+3.1$ ;  $-4.5\%$ , а в случае кручения с растяжением  $+2.3$ ;  $-1.8\%$  и  $+5.8$ ;  $-2.2\%$ .

Анализ полученных опытных данных был проведен на основе зависимости интенсивностей деформаций сдвига  $\Gamma$  от интенсивностей касательных напряжений  $T$ , выражения которых в цилиндрической координатной системе следующие [6]:

при одноосном растяжении труб —

$$T = \frac{1}{\sqrt{3}} |\sigma_z| \quad (1)$$

$$\Gamma = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{(\varepsilon_z - \varepsilon_r)^2 + (\varepsilon_r - \varepsilon_\theta)^2 + (\varepsilon_\theta - \varepsilon_z)^2} \quad (2)$$

при кручении —

$$T = |\tau_{\theta z}| \quad (3)$$

$$\Gamma = |\gamma_{\theta z}| \quad (4)$$

при растяжении труб в условиях постоянно действующего крутящего момента или при их кручении в условиях постоянно действующего растягивающего усилия —

$$T = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\sigma_z^2 + 3\tau_{\theta z}^2} \quad (5)$$

$$\Gamma = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{(\varepsilon_z - \varepsilon_r)^2 + (\varepsilon_r - \varepsilon_\theta)^2 + (\varepsilon_\theta - \varepsilon_z)^2 + \frac{3}{2} \gamma_{\theta z}^2} \quad (6)$$

В выражениях (2) и (6)  $\varepsilon_r = -\bar{v}_1 \varepsilon_z$ ,  $\varepsilon_\theta = -\bar{v}_2 \varepsilon_z$ . Относительно коэффициентов  $\bar{v}_1$  и  $\bar{v}_2$  отметим следующее: имея в виду, что в данном случае нелинейность испытываемого материала слабо выражена, можно пользоваться понятием коэффициента поперечных деформаций  $\bar{v}_1$  и  $\bar{v}_2$ . Среднее значение этих коэффициентов, определенное из экспериментов одноосного растяжения стеклотканевых образцов в виде

удлиненных двухсторонних лопаток по DIN 53455 [7], составило приблизительно 0.2 и 0.16, соответственно.

С другой стороны, известно, что величины  $\varepsilon_r$  и  $\varepsilon_\theta$ , фигурирующие в выражениях (2) и (6), можно представить в виде [6]:

$$\varepsilon_r = dU_r / dr \approx \Delta h / h \quad (7)$$

$$\varepsilon_\theta = U_r / r \approx \Delta r / r \quad (8)$$

где  $h$  — толщина стенки,  $\Delta h$  — изменение толщины стенки,  $r$  — радиус,  $\Delta r$  — изменение радиуса внешней поверхности образца.

Следует отметить, что измерение значения  $\Delta h$  связано с определенными трудностями, в то время как измерение  $\Delta r$  можно осуществить с достаточной точностью.

Согласно результатам опытов, проведенных на стеклотканевых трубчатых образцах, разница между величинами  $\varepsilon_\theta \approx \Delta r / r$  и  $\varepsilon_\theta = |\varepsilon_r \bar{V}_2|$  в рассматриваемом интервале напряжений незначительна.

Аппроксимация экспериментальных соотношений между  $T$  и  $\Gamma$  на участках восходящей ( $\rightarrow$ ) и нисходящей ( $\leftarrow$ ) ветвей петли гистерезиса в пределах цикла была произведена дробнолинейной функцией следующего вида:

$$\bar{T} = T_B \cdot \frac{\Gamma - \Gamma_{\text{ост}}}{\bar{a} \pm \bar{b}(\Gamma - \Gamma_{\text{ост}})} \quad (9)$$

где  $T_B$  — предельная величина  $T$ , соответствующая разрушению опытных образцов,  $\Gamma_{\text{ост}}$  — величина интенсивностей остаточных деформаций сдвига цикла,  $\bar{a}$  и  $\bar{b}$  — параметры аппроксимации.

В знаменателе формулы (9) знак (+) выбирается в случае выпуклости вверх кривой деформирования, а знак (−) — при ее вогнутости вверх.

Оценка гистерезиса опытных образцов в упомянутых выше случаях циклического нагружения-разгрузки произведена на основе коэффициента рассеяния энергии  $\Psi$ , выражаемого следующей формулой:

$$\Psi = 1 - \frac{\bar{b} \left\{ \mp (\Gamma_{\text{амп}} - \Gamma_{\text{ост}}) - \bar{X} \ln |1 \mp (\Gamma_{\text{амп}} - \Gamma_{\text{ост}}) / \bar{X}| \right\}}{\bar{b} [\pm \Gamma_{\text{амп}} - \bar{X} \ln |1 \pm \Gamma_{\text{амп}} / \bar{X}|]} \quad (10)$$

где  $\Gamma_{\text{амп}}$  — амплитудная величина интенсивностей деформаций сдвига,  $\bar{X} = \bar{a} / \bar{b}$ .

В выражении (10), как и в формуле (9), при двойных знаках верхние знаки выбираются в случае выпуклости вверх кривых деформирования, а нижние — в случае их вогнутости.

Следует отметить, что зависимость (10) получается из известного соотношения [8]

$$\Psi = \Delta W / W \quad (11)$$

с использованием выражения (9), учитывая при этом, что величины рассеяния энергии за цикл  $\Delta W$  и полной энергии  $W$  представляют собой соответственно площади петли гистерезиса и площади, ограниченной восходящей ветвью гистерезиса и осью  $\Gamma$ .



## 2. Обсуждение результатов исследований

А. Для аналитического описания процесса деформирования стеклопластиковых труб, подвергнутых повторно-статическому растяжению, как одноосному, так и в условиях  $\tau_{\theta z} = 0,3\tau_B = \text{const}$ , были определены соответствующие параметры формулы (9) для всех циклов испытаний. Их значения для I, II, III и XII циклов приведены в табл. 1.

Кривые петли гистерезиса, построенные, согласно зависимости (9), с использованием параметров табл.1, приведены на фиг.1, где точками показаны экспериментальные данные.

Из фиг.1 можно заключить, что описание дробнолинейной функцией (9) экспериментальных зависимостей между  $T$  и  $\Gamma$  в указанных выше случаях испытаний стеклопластиковых труб приемлемо.

Диаграммы изменений интенсивностей амплитудных и остаточных деформаций сдвига в зависимости от номера цикла испытаний труб ( $n$ ) приведены на фиг. 2.

Таблица 1

№№ цикла испытаний	Параметры						
	$T_B$ , МПа	Гамп $\times 10^3$	Гост $\times 10^3$	По восходящей ветви петли гистерезиса		По нисходящей ветви петли гистерезиса	
				$\bar{a} \times 10^3$	$\bar{b}$	$\bar{a} \times 10^3$	$\bar{b}$
Одноосное растяжение							
I	84.93	13.85	1.48	16.40	0.624	25.00	0.213
II		12.87	0.25	19.00	0.332	25.00	0.173
III		13.02	0.18	19.00	0.349	25.50	0.177
XII		13.58	0.12	19.64	0.359	26.98	0.156
Растяжение при наличии постоянного крутящего момента							
I	86.40	10.82	10.18	31.28	0.43	8.40	9.50
II		4.07	2.21	6.80	0.80	5.00	0.20
III		3.27	1.15	6.16	0.90	6.12	0.10
XII		2.77	0.33	3.80	1.10	3.45	1.06

Согласно фиг.2а после I цикла испытаний стеклопластиковых труб на одноосное растяжение наблюдается уменьшение Гамп., значение которого незначительно. В дальнейшем, с увеличением числа циклов  $n$ , имеет место некоторое увеличение значения Гамп. В случае же циклического растяжения труб в условиях  $\tau_{\theta z} = 0,3\tau_B = \text{const}$  с увеличением номера цикла  $n$ , значения Гамп. уменьшаются, асимптотически стремясь к некоторой величине: значение соотношения Гамп., полученных при I и XII циклах составляет приблизительно 3.9 (фиг.2а).

Из фиг.2а также следует, что при циклическом растяжении труб наличие постоянного крутящего момента, соответствующего  $\tau_{\theta z} = 0,3\tau_B$ , приводит к уменьшению значений Гамп. в 1.3-4.9 раза в зависимости от номера цикла  $n$ .

Согласно фиг.2б увеличение числа циклов  $n$  приводит к уменьшению с убывающей скоростью величин Гост. стеклопластиковых труб, испытанных на циклическое растяжение, как одноосное, так и в условиях

$\tau_{0z} = 0,3\tau_B = \text{const}$ . При этом величина отношений Гост., полученная при I и XII циклах испытаний, составляет более чем 13 в первом случае и 30 — во втором случае испытаний труб. Значения Гост., полученные при циклическом растяжении труб в условиях  $\tau_{0z} = 0,3\tau_B = \text{const}$ , превосходят величины Гост., полученные при циклическом одноосном растяжении в 7-3 раза в зависимости от номера цикла  $n$  (фиг.2б).

Из анализа соответствующих данных фиг.2а и 2б можно заключить, что образование замкнутой петли гистерезиса при одноосном циклическом растяжении труб практически происходит уже через 5-6 циклов. В случае же циклического растяжения труб в условиях  $\tau_{0z} = 0,3\tau_B = \text{const}$  отмеченное явление не наблюдается даже после 12 циклов нагружения-разгрузки.

Кривые изменения коэффициента рассеяния энергии  $\Psi$  в зависимости от номера цикла  $n$ , построенные согласно зависимости (10) с использованием данных табл.1, приведены на фиг.3.

Из фиг.3 следует, что увеличение числа циклов  $n$  до 12 приводит к уменьшению значений коэффициента  $\Psi$  приблизительно в 7.7 раза в случае циклического растяжения труб в условиях  $\tau_{0z} = 0,3\tau_B = \text{const}$  и 2.3 раза — в случае их одноосного циклического растяжения. Согласно данным фиг.3, в I цикле испытаний величина коэффициента  $\Psi$  в случае циклического растяжения труб в условиях  $\tau_{0z} = 0,3\tau_B = \text{const}$  приблизительно в 4 раза превосходит аналогичную величину, полученную при одноосном нагружении-разгрузке труб. В дальнейшем с увеличением числа циклов  $n$  значение указанного соотношения уменьшается и в XII цикле испытаний, оно составляет приблизительно 1.2.

Отметим, что сразу после приложения крутящего момента в образцах проявляется интенсивная ползучесть [9]. Это, вероятно, является причиной существенного рассеяния энергии в первых циклах осевого циклического нагружения при наличии  $\tau_{0z}$ .

Б. Величины параметров, входящих в формулу (9), описывающую экспериментальные зависимости  $\Gamma$  от  $T$  для I, II, III и XII циклов испытаний труб на повторно-статическое кручение при одновременном действии постоянного растягивающего напряжения  $\sigma_z = 0,6\sigma_B$  и при его отсутствии, приведены в табл.2.

Кривые петли гистерезиса, построенные согласно зависимости (9), с использованием соответствующих параметров табл.2, приведены на фиг.4, где точками показаны экспериментальные данные.

Из фиг.4 следует, что описание дробнолинейной функцией экспериментальных зависимостей между  $T$  и  $\Gamma$  приемлемо и в рассматриваемых здесь случаях циклического нагружения стеклопластиковых труб.

Кривые изменений интенсивностей амплитудных и остаточных деформаций сдвига в пределах цикла в зависимости от номера цикла испытаний  $n$  приведены на фиг.5.

Из фиг.5а следует, что в случае простого кручения труб после I цикла нагружения-разгрузки имеет место несущественное снижение величины  $\Gamma_{\text{амп.}}$ , а в дальнейшем, с увеличением номера цикла  $n$ , наблюдается тенденция к её возрастанию. При циклическом же кручении труб в



условиях  $\sigma_z = 0,6\sigma_B = \text{const}$  с увеличением номера цикла  $n$  до 12 имеет место монотонное уменьшение значений Гамп, приблизительно в 1.4 раза (фиг.5а).

Из фиг.5а также следует, что в случае повторно-статического кручения стеклопластиковых труб, наличие постоянного растягивающего напряжения  $\sigma_z = 0,6\sigma_B$  приводит к снижению Гамп. в 2.3-3.0 раза в зависимости от номера циклов испытаний  $n$ .

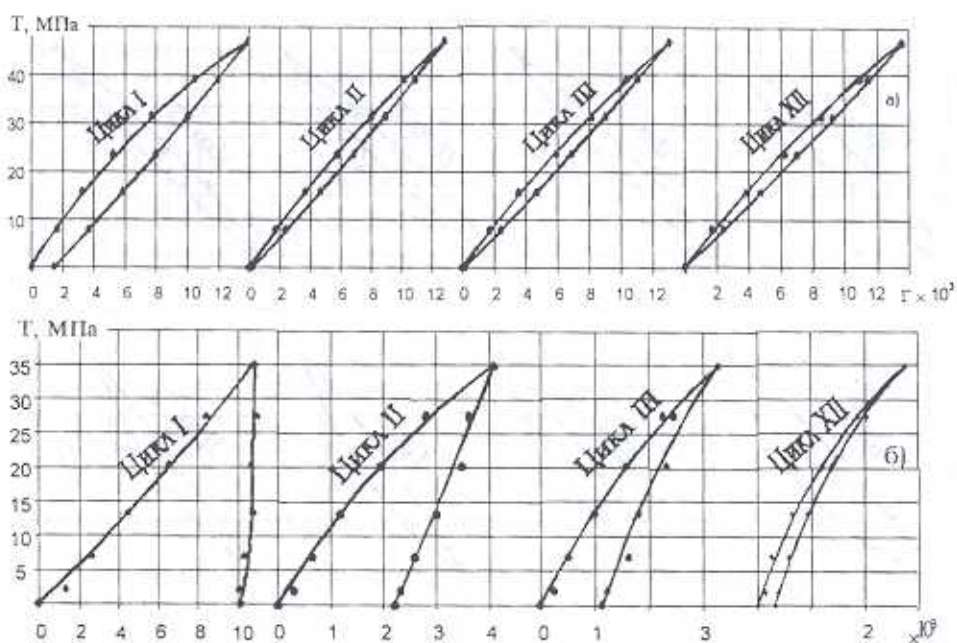
Таблица 2

№№ цикла испытаний	Параметры						
	$T_B$ , МПа	Гамп $\times 10^3$	Гост $\times 10^3$	По восходящей ветви петли гистерезиса		По нисходящей ветви петли гистерезиса	
				$\bar{a} \times 10^3$	$\bar{b}$	$\bar{a} \times 10^3$	$\bar{b}$
Кручение							
I	47.1	13.45	1.13	33.50	0.842	57.00	1.293
II		13.07	0.53	34.60	0.686	57.80	1.275
III		13.02	0.47	34.60	0.676	57.80	1.272
XII		13.14	0.37	34.64	0.682	59.99	1.238
Кручение при наличии растягивающего усилия							
I	77.3	6.12	0.34	178.00	8.00	540.00	56.00
II		4.94	0.07	181.30	10.00	446.70	45.00
III		4.77	0.06	184.20	8.00	410.00	40.00
XII		4.49	0	198.34	2.50	389.00	40.00

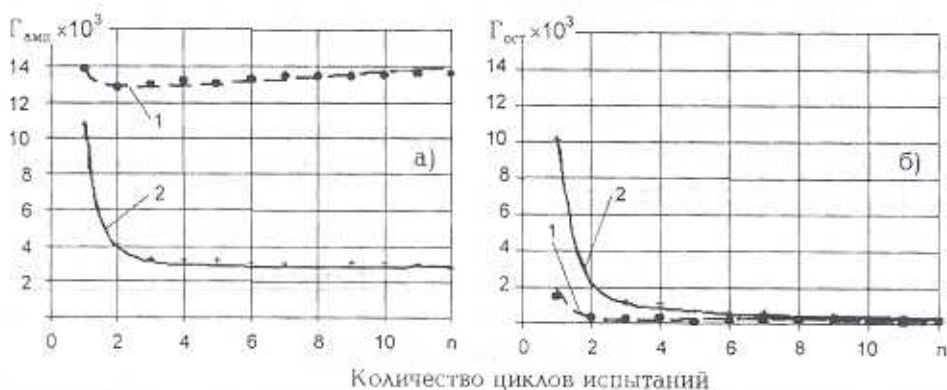
Согласно данным фиг.5б, увеличение номера цикла  $n$  приводит к уменьшению значений Гост. с убывающей скоростью как в случае испытаний труб на циклическое кручение, так и при их кручении в условиях  $\sigma_z = 0,6\sigma_B = \text{const}$ ; при этом отмеченное явление во втором случае испытания более существенно. Из фиг.5б также следует, что приложение постоянного растягивающего напряжения  $\sigma_z = 0,6\sigma_B$  приводит к существенному уменьшению значений Гост. для одного и того же номера цикла повторно-статического кручения. В результате этого образование замкнутой петли гистерезиса у труб, испытанных на циклическое кручение в условиях  $\sigma_z = 0,6\sigma_B = \text{const}$ , практически наблюдается уже во II цикле, а у труб, подвергнутых циклическому кручению — через 5-6 циклов.

Кривые изменения коэффициента  $\Psi$ , построенные, согласно зависимости (10) с использованием параметров табл.2, приведены на фиг.6. Согласно этим данным, увеличение номера цикла испытаний до 12 приводит к уменьшению значений коэффициента  $\Psi$  в 1.5 раза при циклическом простом кручении и 1.8 раза в случае циклического кручения труб при наличии  $\sigma_z = 0,6\sigma_B = \text{const}$ .

Из фиг.6 также следует, что приложение постоянного растягивающего напряжения  $\sigma_z = 0,6\sigma_B = \text{const}$  приводит к увеличению коэффициента рассеяния энергии стеклопластиковых труб, подвергнутых циклическому кручению, в 1.5—1.3 раза в зависимости от номера цикла  $n$ .

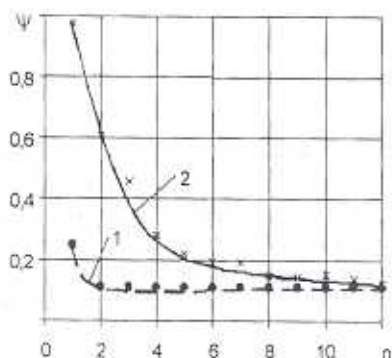


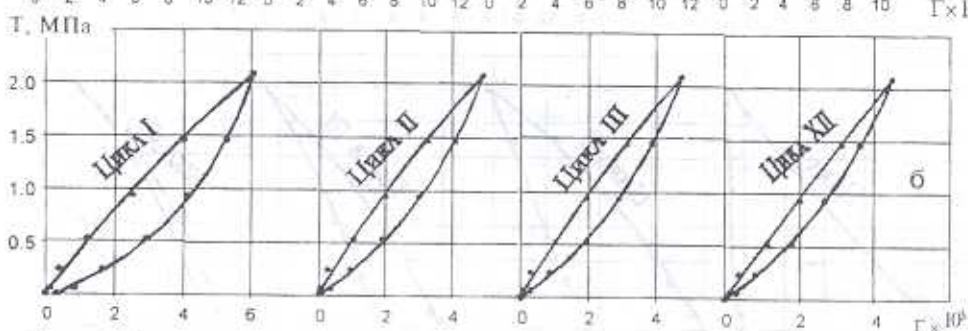
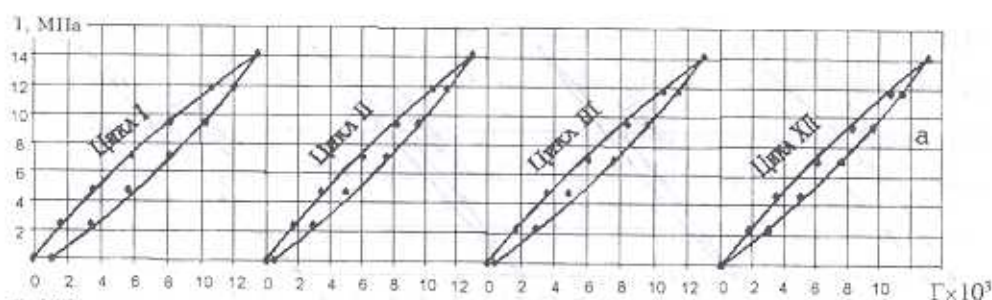
Фиг. 1. Кривые петли гистерезиса стеклопластиковых труб, построенные согласно зависимости (9) в случае повторно-статического одноосного растяжения (а) и растяжения в условиях  $\tau_{02} = 0,3\tau_B = \text{const}$  (б).



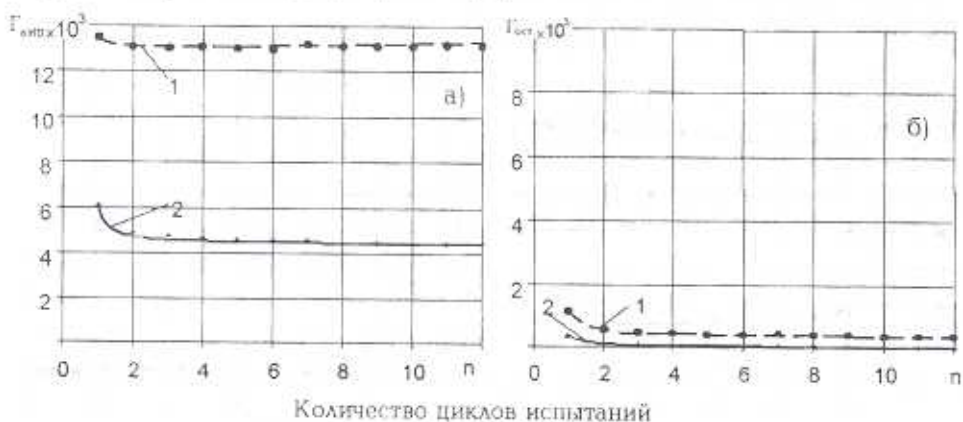
Фиг. 2. Кривые изменения интенсивностей амплитудных (а) и остаточных (б) деформаций сдвига в зависимости от номера цикла испытаний стеклопластиковых труб на повторно-статическое одноосное растяжение (1) и растяжение в условиях  $\tau_{02} = 0,3\tau_B = \text{const}$  (2).

Фиг. 3. Кривые изменения коэффициента рассеяния энергии  $\psi$  стеклопластиковых труб, подвергнутых повторно-статическому одноосному растяжению (1) и растяжению в условиях  $\tau_{02} = 0,3\tau_B = \text{const}$  (2), в зависимости от номера цикла испытаний  $n$ .

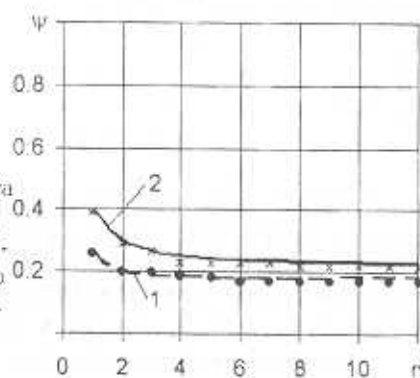




Фиг. 4. Кривые петли гистерезиса стеклопластиковых труб, построенные согласно зависимости (9) в случае повторно-статического кручения (а) и кручения в условиях  $\sigma_z = 0,6\sigma_{\text{н}} = \text{const}$  (б).



Фиг. 5. Кривые изменения интенсивностей амплитудных (а) и остаточных (б) деформаций сдвига цикла в зависимости от номера цикла испытаний стеклопластиковых труб на повторно-статическое одноосное кручение (1) и кручение в условиях  $\sigma_z = 0,6\sigma_{\text{н}} = \text{const}$  (2).



Фиг. 6. Кривые изменения коэффициента рассеяния энергии  $\psi$  стеклопластиковых труб, подвергнутых повторно-статическому одноосному кручению (1) и кручению в условиях  $\sigma_z = 0,6\sigma_{\text{н}} = \text{const}$  (2), в зависимости от номера цикла испытаний  $n$ .



### Выводы

1. Приложение постоянного крутящего момента приводит к существенному уменьшению (в 1.3-4.9 раза в зависимости от номера цикла) интенсивностей амплитудных деформаций сдвига стеклопластиковых труб с  $\varphi = 0^\circ$ , подвергнутых повторно-статическому растяжению. Для интенсивностей остаточных деформаций сдвига и коэффициента рассеяния энергии имеет место обратное явление: при этом наблюдаемая в первых циклах существенная разница между величинами упомянутых аналогичных характеристик с увеличением числа циклов нагружения-разгрузки уменьшается.

2. При повторно-статическом кручении стеклопластиковых труб с  $\varphi = 0^\circ$ , наличие постоянного растягивающего усилия приводит к существенному уменьшению величин интенсивностей амплитудных и остаточных деформаций сдвига в пределах цикла и, тем существеннее, чем больше количество циклов нагружения-разгрузки. Для коэффициента рассеяния энергии имеет место обратное явление.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Малмейстер А.К., Тамуж В.П., Тетерс Г.А. Сопротивление полимерных и композитных материалов. Рига: Зинатне, 1980. 571с.
2. Механика композитов. В 12 томах. Механика разрушения. Т.5. (под редакцией Гузя А.Н.). Киев: ПТОО "А.С.К.", 1996. 340с.
3. Портнов Г.Г., Баринов И.Н. Экспериментальное исследование собственных частот и декрементов колебаний ободковых маховиков из композитов. // Мех. комп. мат., 1992, №5, с.639-643.
4. Мошев В.В., Ковров В.Н. Экспериментальное исследование вклада межфазного трения в сопротивление деформированию дискретно-армированных полимеров.//Мех. комп. мат., 1995, №5, с. 579-583.
5. Карапетян К.А., Саркисян Н.Е., Хачикян А.Г. Прочность и деформативность слоистых пластиков при сложном нагружении. // Изв. НАН Армении и ГИУА, сер. техн. наук, 1998, №2, с. 127-132.
6. Качанов Л.М. Основы теории пластичности. М.: Наука, 1969. 420с.
7. Тарнопольский Ю.М., Киндис Т.Я. Методы статических испытаний армированных пластиков. М.: Химия, 1981. 271с.
8. Пановко Я.Г. Внутреннее трение при колебаниях упругих систем. М.: Гос. изд. физ.-мат. литературы, 1960. 193 с.
9. Карапетян К. А. Влияние осевого растягивающего усилия на ползучесть стеклопластиковых трубчатых образцов, подверженных кручению.// Докл. НАН Армении. 2000. Т. 100. №1. С. 20-25.

Институт механики  
НАН Армении

Поступила в редакцию  
20.04.2001