

УДК 678.057: 620.17:539.37

Օ ԴԵՓՈՐՄԱՑԻՈՆՆՅԱՆ ՏՎՈՒՄԻՆԵՐԻ ՍՏՈՒՄԻՆԵՐԻ ԵՎ ԿՐԿՆՎՈՂ-ՍՏԱՄԱՆԻԿ ԺՐԱՄԱՆՆԵՐ Ե ԲՈՐՈՂ ԵՆՈՆԱՎՈՐՄԱՆ ԴԵՎՐՈՄ

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

Կ.Ա.Կարապետյան, Ն.Ե.Տարկիսյան, Ա.Ն.Խուչիկյան, Ա.Ն.Ազնաուրյան
Ստանդարտիզացիոնալ ինժեներական հասկարչություններ կրկնվող-ստատիկ ժրամանք և բորող
ենոնավորման դեվրոմ

Բերվում են կրկնվող-ստատիկ ձգման ենթարկվող ապակեպլաստիկ թուղակապատ խողովակների դեֆորմացիոնալ հասկարչությունների վրա հաստատուն մեծություն որոշող մանենտի ստեղծարարական ազդեցություն կրկնվող-ստատիկ հետազոտման արդյունքները: Գլխարկվում է նաև կրկնվող-ստատիկ ժրման դեվրոմ հաստատուն ձգող ճիլի ազդեցությամբ խողովակների դեֆորմացիոնալ հասկարչությունների վրա:

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

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

Приводятся результаты экспериментального исследования влияния постоянного крутящего момента на деформационные свойства стеклопластиковых труб, подвергнутых повторно-статическому растяжению. Рассматриваются также влияние постоянного растягивающего усилия на деформационные 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 нагрузений 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 ($\theta = 0^\circ$). 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 Γ от интенсивностей касательных напряжений T , выражения которых в цилиндрической координатной системе следующие [6]:

при одноосном растяжении труб —

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

$$\Gamma = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{(\epsilon_z - \epsilon_r)^2 + (\epsilon_r - \epsilon_\theta)^2 + (\epsilon_\theta - \epsilon_z)^2} \quad (2)$$

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 —

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

$$\Gamma = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{(\epsilon_z - \epsilon_r)^2 + (\epsilon_r - \epsilon_\theta)^2 + (\epsilon_\theta - \epsilon_z)^2 + \frac{3}{2} \gamma_{\theta z}^2} \quad (6)$$

В выражениях (2) и (6) $\epsilon_r = -\bar{\nu}_1 \epsilon_z$, $\epsilon_\theta = -\bar{\nu}_2 \epsilon_z$. Относительно коэффициентов $\bar{\nu}_1$ и $\bar{\nu}_2$ отметим следующее: имея в виду, что в данном случае нелинейность испытуемого материала слабо выражена, можно пользоваться понятием коэффициента поперечных деформаций $\bar{\nu}_1$ и $\bar{\nu}_2$. 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 ε_r и ε_θ , 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, Δh — изменение толщины стенки, r — радиус, Δr — изменение радиуса внешней поверхности образца.

Следует отметить, что измерение значения Δh связано с определенными трудностями, в то время как измерение Δr можно осуществить с достаточной точностью.

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

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

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

где T_B — предельная величина T , соответствующая разрушению опытных образцов, $\Gamma_{ост}$ — 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 Ψ , выражаемого следующей формулой:

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

где $\Gamma_{амп}$ — амплитудная величина интенсивностей деформации 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 ΔW и полной энергии W представляют собой соответственно площади петли гистерезиса и площади, ограниченной восходящей ветвью гистерезиса и осью Γ .

2. Обсуждение результатов исследований

А. Для аналитического описания процесса деформирования стеклопластиковых труб, подвергнутых повторно-статическому растяжению, как одноосному, так и в условиях $\tau_{02} = 0,3\tau_n = \text{const}$, 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 Γ 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_d , МПа	Гамп, $\cdot 10^3$	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 $\tau_{02} = 0,3\tau_n = \text{const}$ 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 $\tau_{02} = 0,3\tau_n$, 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

$\tau_{02} = 0,3\tau_B = \text{const}$. 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 $\tau_{02} = 0,3\tau_B = \text{const}$, 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 $\tau_{02} = 0,3\tau_B = \text{const}$ отмеченное явление не наблюдается даже после 12 циклов нагружения-разгрузки.

Кривые изменения коэффициента рассеяния энергии Ψ 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 Ψ приблизительно в 7,7 раза в случае циклического растяжения труб в условиях $\tau_{02} = 0,3\tau_B = \text{const}$ и 2,3 раза — в случае их одноосного циклического растяжения. Согласно данным фиг.3, в I цикле испытаний величина коэффициента Ψ в случае циклического растяжения труб в условиях $\tau_{02} = 0,3\tau_B = \text{const}$ 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 τ_{02} .

Б. Величины параметров, входящих в формулу (9), описывающую экспериментальные зависимости Γ от T для I, II, III и XII циклов испытаний труб на повторно-статическое кручение при одновременном действии постоянного растягивающего напряжения $\sigma_2 = 0,6\sigma_B$ 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 Γ приемлемо и в рассматриваемых здесь случаях циклического нагружения стеклопластиковых труб.

Кривые изменений интенсивностей амплитудных и остаточных деформаций сдвига в пределах пика в зависимости от номера цикла испытания 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 $\Gamma_{\text{амп}}$, 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 $\Gamma_{\text{амп}}$ в 2.3-3.0 раза в зависимости от номера циклов испытаний n .

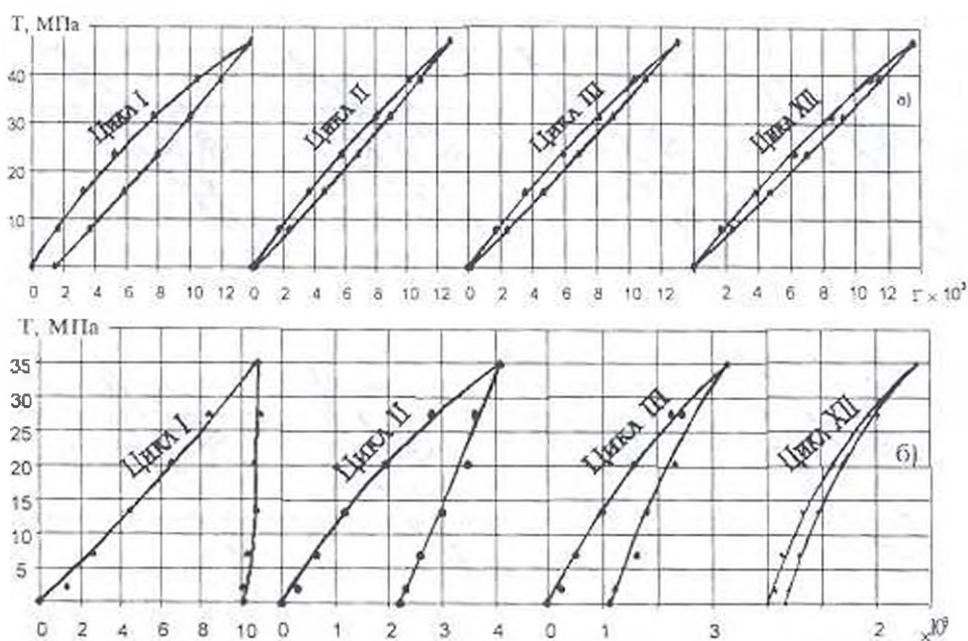
Таблица 2

№№ цикла испытаний	Параметры						
	T_B , МПа	$\Gamma_{\text{амп}} \times 10^3$	$\Gamma_{\text{ост}} \times 10^1$	По восходящей ветви петли гистерезиса		По нисходящей ветви петли гистерезиса	
				$\bar{a} \times 10^3$	\bar{b}	$\bar{a} \times 10^1$	\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

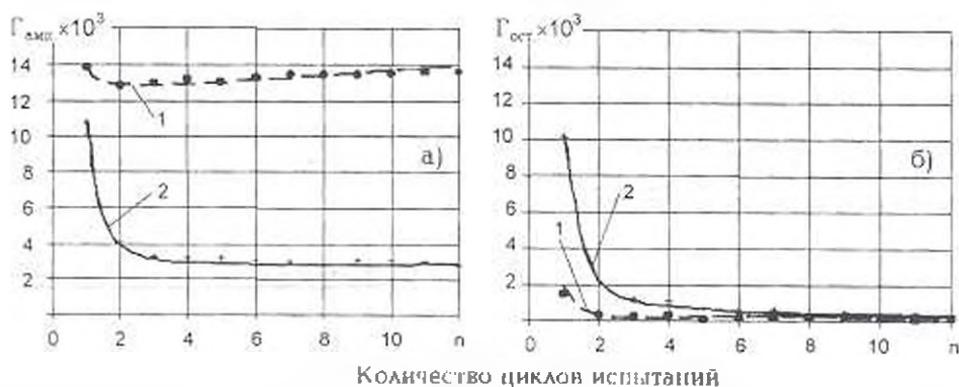
Согласно данным фиг.5б, увеличение номера цикла n приводит к уменьшению значений $\Gamma_{\text{ост}}$ с убывающей скоростью как в случае испытаний труб на циклическое кручение, так и при их кручении в условиях $\sigma_z = 0,6\sigma_B = \text{const}$; при этом отмеченное явление во втором случае испытания более существенно. Из фиг.5б также следует, что приложение постоянного растягивающего напряжения $\sigma_z = 0,6\sigma_B$ приводит к существенному уменьшению значений $\Gamma_{\text{ост}}$ 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 Ψ , 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 Ψ 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 .

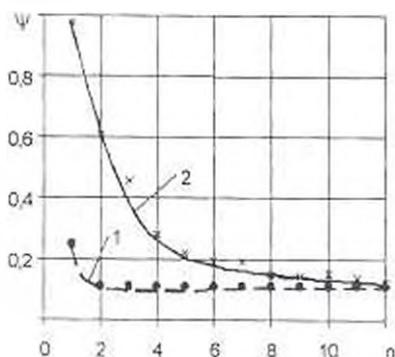


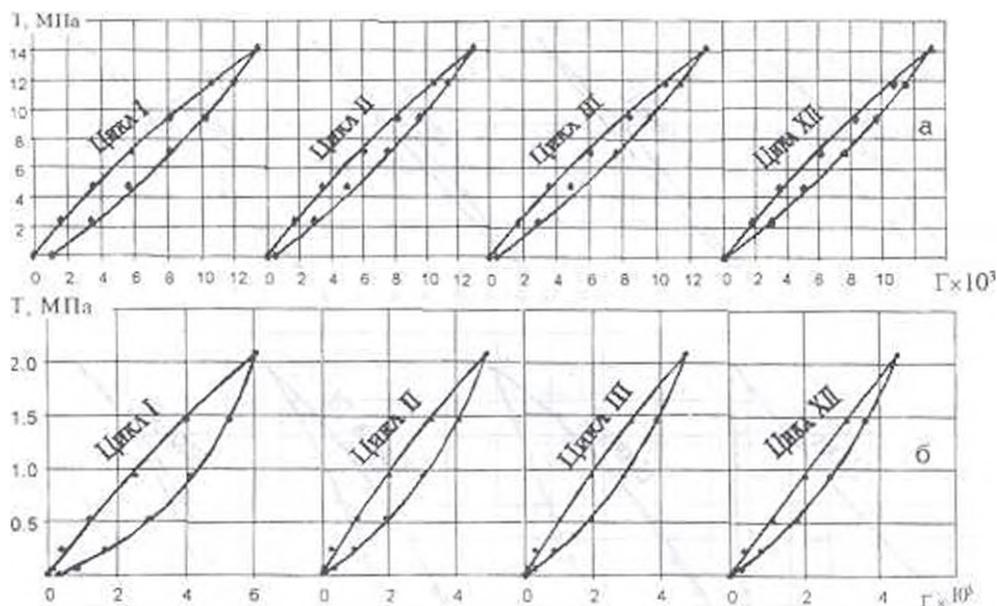
Фиг. 1. Кривые петли гистерезиса стеклопластиковых труб, построенные согласно зависимости (9) в случае повторно-статического одноосного растяжения (а) и растяжения в условиях $\tau_{02} = 0,3\tau_n = \text{const}$ (б)



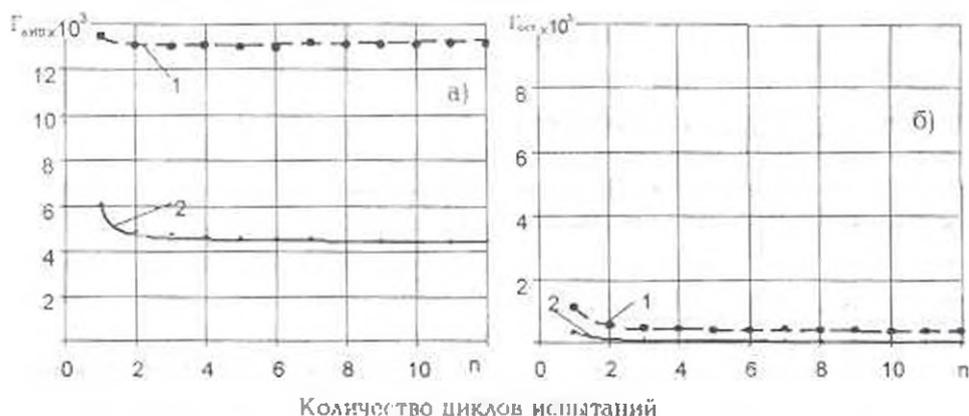
Фиг. 2. Кривые изменения интенсивностей амплитудных (а) и остаточных (б) деформаций сдвига в зависимости от номера цикла испытаний стеклопластиковых труб на повторно-статическое одноосное растяжение (1) и растяжение в условиях $\tau_{02} = 0,3\tau_n = \text{const}$ (2).

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

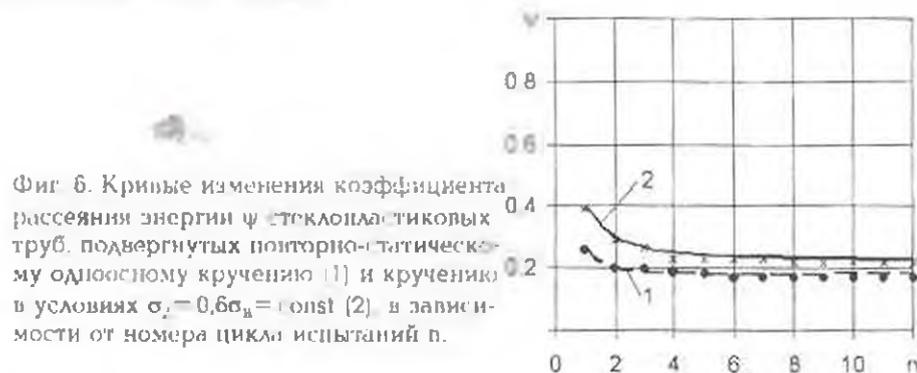




Фиг. 4. Кривые негати гистерезиса стеклопластиковых труб, построенные: согласно зависимости (9) в случае повторно-статического кручения (а) и кручения в условиях $\sigma_z = 0,6\sigma_H = \text{const}$ (б).



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



Фиг. 6. Кривые изменения коэффициента рассеяния энергии ψ стеклопластиковых труб, подвергнутых повторно-статическому одноосному кручению (1) и кручению в условиях $\sigma_z = 0,6\sigma_H = \text{const}$ (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. Мошен 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