

Н. Е. САРКИСЯН, О. С. СИРОТКИН, В. В. ВОРОБЕЙ,  
М. М. МАРТИРОСЯН, А. Н. КАГРАМАНЯН

## СУММИРОВАНИЕ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПРИ КВАЗИСТАТИЧЕСКОМ И ПЕРЕМЕННОМ НАГРУЖЕНИИ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Конструкции и детали из стекловолоконистого композиционного материала испытывают различного рода нагрузки, могущие дискретно меняться во времени в процессе эксплуатации. Поэтому представляет определенный интерес в связи с выбором запасов прочности изучение степени влияния предварительного нагружения на изменение механических свойств материала при последующем статическом кратковременном нагружении.

Еще в 1952 году было установлено, что предварительное циклическое нагружение не влияет на характер кривой напряжение-деформация ( $\sigma \sim \epsilon$ ) и предел прочности  $\sigma_*$  однонаправленного стеклопластика при последующем статическом растяжении или сжатии [1]. В дальнейшем этот вопрос стал предметом изучения для других авторов [2—8 и др.]. В этих работах было рассмотрено влияние одного простого гармонического вида циклического деформирования (растяжение [1], [5—7], сжатие [1], растяжение-сжатие [4], изгиб [2, 3]). Кроме того, анизотропия механических свойств стеклопластика не учитывалась (нагрузка прикладывалась только в направлении армирования).

В указанных работах не была установлена общая закономерность изменения остаточной прочности от величины напряжения или количества циклов предварительного нагружения. По полученным экспериментальным результатам можно заключить, что изменение остаточной прочности стеклопластика  $\sigma_{ост}$  носит несколько разный характер в зависимости от вида предварительной деформации. Если при изгибе остаточная прочность резко уменьшается по мере увеличения циклического напряжения и в зависимости от материала [2, 3] составляет от 15—60 до 60—95% исходного значения прочности  $\sigma_*$  ( $N = 10^4 \div 10^7$  циклов), то при осевой деформации, наоборот, снижение предела прочности при последующем растяжении становится более заметным при большем количестве циклов предварительного нагружения ( $N > 10^5$  циклов). Кроме того, в последнем случае, по сравнению с изгибом, падение прочности меньше ( $\sigma_{ост} = 0.70-0.85 \cdot \sigma_*$ ) [4—6] или, даже, изменением прочности можно пренебречь [1, 7].

Что касается влияния предварительного деформирования на модуль упругости  $E$  стеклопластика, то его снижение по сравнению с исходным значением оказывается еще меньше и практически не зависит от числа циклов нагружения в области многоциклового усталости [1, 5—7].

Влияние длительного статического нагружения (ползучесть) на изменение остаточной прочности и деформативности стеклопластиков исследо-

вано в работах [9—12], где рассмотрено только одноосное растяжение. Анизотропия механических свойств материала изучалась лишь в [9, 10], где нагрузка прикладывалась не только вдоль волокон ( $\varphi=0^\circ$ ), но и в направлениях  $\varphi=15^\circ, 30^\circ$  и  $45^\circ$ .

Установлено, что процесс ползучести практически не отражается на зависимости  $\sigma \sim \varepsilon$  при последующем кратковременном растяжении, если испытуемые образцы вырезаны вдоль волокон стеклопластика [9]. В этом случае наблюдается некоторое упрочнение материала (по прочности на 10—15%). В случаях же приложения нагрузки в направлениях  $\varphi \neq 0^\circ$ , когда в работу композита вовлекается и полимерное связующее, наблюдается не только более значительное изменение остаточной прочности  $\sigma_{ост}$  (на 5—40% в зависимости от напряжения, продолжительности ползучести и угла  $\varphi$ ), но и меняется зависимость  $\sigma \sim \varepsilon$  [9].

В отношении тканых стеклопластиков литературные данные несколько противоречивы [11, 12]. Для различных материалов, в зависимости от температурно-влажностных условий испытаний, предварительное воздействие длительно растягивающей нагрузки может вызвать как упрочнение материала (до 15—20%) [11, 12], так и может не отразиться на механических свойствах композита, либо стать причиной его разупрочнения [11].

Целью настоящей работы явилось исследование влияния предварительного нагружения квазистатическими и переменными нагрузками на изменение прочности и деформативности стеклопластика при последующем однократном кратковременном статическом растяжении, когда предварительное нагружение во времени проходит по совершенно различным законам.

Рассмотрено влияние совокупности трех видов силового воздействия:

- 1) вибрационного или многоциклового растяжения частотой 1200 *цикл/мин* (для удобства изложения этот вид нагружения условно обозначим  $\alpha$ ),
- 2) повторно-статического или малоциклового растяжения частотой 1 *цикл/мин* (вид нагружения —  $\beta$ ) и 3) длительного статического растяжения (ползучести), воздействие которого обозначим через  $\gamma$ . Влияние предварительного растяжения изучено в зависимости от очередности приложения силовых факторов типа  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  и продолжительности их воздействия.

Исследование проведено с учетом анизотропии механических свойств стеклопластика, для чего нагрузка прикладывалась в направлении армирования (основы ткани,  $\varphi=0^\circ$ ) и в направлении под углом  $\varphi=45^\circ$ .

В качестве материала для испытаний служил стеклотекстолит, изготовленный методом прессования на основе ткани ТСУ-8/3-78М и связующего ЭДТ-10.

Опыты проводились на плоских образцах, вырезанных из листов стеклотекстолита толщиной от 3,2 до 4,8 мм. Образцы имели форму двухсторонней лопатки с радиусом перехода к галтелям, равным 75 мм. Ширина и длина рабочего участка образца составляли 15 и 50 мм. Толщина образца соответствовала толщине листа. Испытание образцов производилось в течение промежутка времени примерно 0,5—1,5 года после изготовления материала при температуре среды  $22 \pm 3^\circ\text{C}$  и относительной влажности

$67 \pm 7\%$ . На каждом уровне напряжения при длительном нагружении испытывалось не менее 3 образцов, а при определении свойств контрольных образцов (неподвергшихся предварительному деформированию) 7 и 18 образцов (соответственно для  $\varphi = 0^\circ$  и  $45^\circ$ ).

Экспериментальное исследование проведено в три этапа.

На первом этапе определяли кривую деформирования для материала в условно исходном состоянии (контрольные испытания). Кривые  $\sigma \sim \epsilon$  снимались на разрывной машине ЦД-10/90 при ручном нагружении, с использованием для измерения деформаций механического тензометра МК-3. Значения предела прочности  $\sigma_b$ , модуля упругости  $E$ , среднеквадратические их отклонения приведены в табл. 1. Графики  $\sigma \sim \epsilon$  показаны на фиг. 1 и 2 сплошными линиями.

Таблица 1  
Данные контрольных испытаний

Угол вырезки $\varphi$ , град	Прочность $\sigma_b$ , кгс/мм <sup>2</sup>	Модуль упру- гости $E$ , кгс/мм <sup>2</sup>
0	$52.70 \pm 1.90$	$2725 \pm 125$
45	$20.85 \pm 3.85$	$1570 \pm 105$

На втором этапе определяли временные зависимости прочности испытуемого стеклотекстолита в условиях нагружения, соответствующих режимам  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$ .

Вибрационное растяжение ( $\alpha$ ) осуществляли на базе  $N = 2 \cdot 10^5$  циклов до разрушения по методике, указанной в [5]. Установлена корреляционная связь усталостной прочности в зависимости от угла  $\varphi$ , имеющая вид

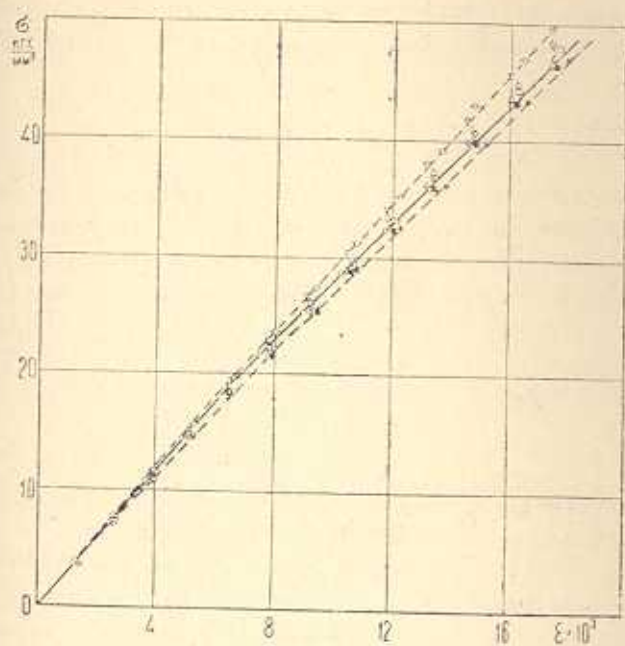
$$\begin{aligned} \sigma_0 &= 52.48 - 6.7385 \lg N \\ \sigma_{45} &= 19.76 - 0.8532 \lg N \end{aligned} \quad (1.1)$$

Повторно-статическое растяжение ( $\beta$ ) проводили на разрывной машине статического деформирования ЦДМ-10, оборудованной специально для этого автоматическими переключателями. Деформирование происходило с постоянной скоростью, соответствующей скорости холостого перемещения захватов машины, равной 6 мм/мин. Если в испытаниях  $\alpha$  осуществлялось отнулевое растяжение, то в данном случае коэффициент асимметрии пульсирующего цикла растяжения колебался в пределах 0.03—0.07, в зависимости от угла  $\varphi$  и величины задаваемого напряжения. База испытаний при малоцикловом нагружении была принята равной  $10^5$  циклам.

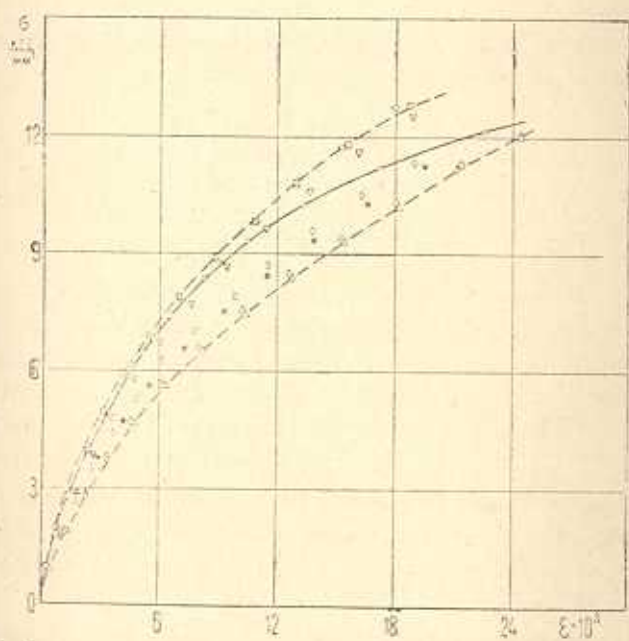
Корреляционная зависимость между усталостной прочностью и соответствующим числом циклов до разрушения в этом случае имеет вид

$$\begin{aligned} \sigma_0 &= 54.24 - 6.7204 \lg N \\ \sigma_{45} &= 26.09 - 2.9958 \lg N \end{aligned} \quad (1.2)$$

Исследование длительной статической прочности проведено по методике [9]. Испытания проводили на базе времени  $2 \cdot 10^4$  мин до разрушения об-



Фиг. 1. Влияние комплекса предварительного нагружения на зависимость  $\sigma \sim \epsilon$  ( $\varphi = 0^\circ$ ), ---- границы влияния.



Фиг. 2. Влияние комплекса предварительного нагружения на зависимость  $\sigma \sim \epsilon$  ( $\varphi = 45^\circ$ ), ---- границы влияния.

разца. Установлена в зависимости от анизотропии корреляционная связь между длительной прочностью и долговечностью  $\tau$  (в мин), имеющая вид

$$\begin{aligned}\sigma_0 &= 47.46 - 2.377 \lg \tau \\ \sigma_{45} &= 16.66 - 7.460 \lg \tau\end{aligned}\quad (1.3)$$

На третьем этапе исследовалось влияние суммирования повреждений при квазистатическом и переменном нагружении на величину остаточной прочности стеклопластика.

В качестве модели для суммирования повреждений была предложена модель в виде полинома

$$\begin{aligned}Z\{b_i T_j\} &= b_0 + b_1 T_1 + b_2 T_2 + \dots + b_{11} T_1^2 + b_{22} T_2^2 + \dots + \\ &+ \dots + b_{111} T_1^3 + b_{222} T_2^3 + \dots\end{aligned}\quad (1.4)$$

где  $Z\{b_i T_j\}$  — параметр, характеризующий величину остаточной прочности  $\sigma_{ост}$ ;  $b_0, b_1, b_2, \dots, b_{11}, b_{22}, \dots, b_i$  — коэффициенты, определяемые из опыта;  $T_1, T_2, \dots, T_j$  — параметры, учитывающие относительное накопление повреждений при заданном виде нагружения.

Учитывая, что параметр  $T_j$  всегда заведомо меньше единицы  $T_j < 1$ , можно упростить модель (1.4), отбросив члены, содержащие степени больше единицы. В этом случае неизвестные коэффициенты определяются из специально построенного эксперимента с использованием греко-латинских планов.

Предварительное деформирование осуществляли в зависимости от порядка чередования видов нагружения по форме

$$\begin{aligned}\alpha_i \rightarrow \beta_j \rightarrow \gamma_k \rightarrow \text{ост} \\ \beta_i \rightarrow \alpha_j \rightarrow \gamma_k \rightarrow \text{ост} \\ \gamma_i \rightarrow \alpha_j \rightarrow \beta_k \rightarrow \text{ост}\end{aligned}\quad (1.5)$$

где  $i, j, k = 1, 2, 3$  соответствуют уровням накопления повреждений в условиях предварительного деформирования одного вида нагружения.

Рассматривались три уровня повреждаемости от предварительного растяжения, которые соответствовали продолжительности деформирования 0.1, 0.2 и 0.3 от базового значения долговечности при данном виде нагружения.

Базовое значение долговечности было принято равным  $N_{p, \alpha} = 2 \cdot 10^6$ ,  $N_{p, \beta} = 200$  циклов и  $\tau_{p, \gamma} = 240$  часов. Таким образом, имели  $\alpha_1 = 2 \cdot 10^5$ ,  $\alpha_2 = 4 \cdot 10^5$  и  $\alpha_3 = 6 \cdot 10^5$  цикл;  $\beta_1 = 20$ ,  $\beta_2 = 40$  и  $\beta_3 = 60$  цикл;  $\gamma_1 = 24$ ,  $\gamma_2 = 48$  и  $\gamma_3 = 72$  часа.

Величину напряжения, соответствующую базовому значению долговечности, вычисляли по корреляционным уравнениям (1—3). При нагружении вдоль основы ткани ( $\varphi = 0^\circ$ ) имели  $\sigma_2 = 10.02$ ,  $\sigma_{\beta} = 40.10$  и  $\sigma_{\gamma} = 37.57$  кгс/мм<sup>2</sup>. При растяжении под углом  $\varphi = 45^\circ$  соответственно:  $\sigma_2 = 4.11$ ,  $\sigma_{\beta} = 19.19$  и  $\sigma_{\gamma} = 13.56$  кгс/мм<sup>2</sup>.

Все испытания проводили практически непрерывно. Переход от одного вида нагружения к другому занимал время не более 5 мин. Следует также отметить, что было изучено влияние продолжительности «отдыха» образца после третьего этапа нагружения на изменение прочности и деформативности при последующем растяжении. Для этого по 3 образца, прошедших определенный цикл по форме (1.5), были испытаны непосредственно после заключительного этапа нагружения и после недельного «отдыха». Результаты испытаний оказались практически одинаковыми. Такое явление было установлено как на образцах, вырезанных вдоль основы ткани, так и в направлении  $\varphi = 45^\circ$ .

Полученные средние значения экспериментальных результатов сведены в табл. 2\* и иллюстрируются графиками, показанными на фиг. 1 и 2.

Таблица 2

Данные испытаний по определению влияния предварительного нагружения

№ п/п	Чередование видов нагружения	Средн. значения характеристик $\text{кгс/мм}^2$				Примечание**
		$\varphi = 0^\circ$		$\varphi = 45^\circ$		
		$\sigma_{ост}^0$	$E$	$\sigma_{ост}^0$	$E$	
1	$\alpha_1 \rightarrow \beta_2 \rightarrow \gamma_3$	55.80	2730	22.62	1120	—
2	$\alpha_2 \rightarrow \beta_3 \rightarrow \gamma_3$	55.10	2850	17.55*	—	$\tau = 33.0$ и $56.0$ час ( $\gamma$ )
3	$\alpha_2 \rightarrow \beta_1 \rightarrow \gamma_3$	53.95	2730	23.97	1480	—
4	$\beta_1 \rightarrow \alpha_2 \rightarrow \gamma_2$	58.91	2755	23.95	1645	$\tau = 8.5$ и $9.5$ час ( $\gamma$ )
5	$\beta_2 \rightarrow \alpha_3 \rightarrow \gamma_2$	—	—	20.72	1260	$\tau = 7.5$ ; $7.5$ и $31.5$ час ( $\gamma$ )
6	$\beta_3 \rightarrow \alpha_1 \rightarrow \gamma_2$	51.65	2605	19.81	1125	$\tau = 8.5$ час ( $\gamma$ )
7	$\gamma_1 \rightarrow \alpha_1 \rightarrow \beta_1$	58.22	2845	24.52	1600	—
8	$\gamma_1 \rightarrow \alpha_2 \rightarrow \beta_2$	55.27	2695	16.38*	—	$N = 14$ цикл ( $\beta$ )
9	$\gamma_1 \rightarrow \alpha_3 \rightarrow \beta_2$	54.42	2700	23.07	1645	—

\* Соответствуют разрушающим нагрузкам первого цикла повторно-статического растяжения ( $\beta$ ).

\*\* Соответствуют образцам ориентации  $\varphi = 0^\circ$ , разрушившимся в процессе указанного вида нагружения.

Несмотря на то, что относительный уровень повреждаемости ( $T_j$ ) не превосходил 0.3, а максимальная суммарная повреждаемость составляла 0.8, часть образцов из-за разброса механических свойств разрушилась до момента определения остаточной прочности. В этих случаях величина  $\sigma_{ост}^0$  задавалась равной величине действующего напряжения последнего вида испытания с добавлением части напряжения, пропорциональной доли поработанного ресурса  $\frac{N_\beta}{N_6}$  или  $\frac{\tau_p}{\tau_6}$ , где  $N_p$  — количество циклов до

\* Значение модуля упругости  $E$  при  $\varphi = 0^\circ$  соответствует начальному линейному участку графика  $\sigma \sim \epsilon$ , а при  $\varphi = 45^\circ$  — напряжению  $0.215 \sigma_a$  (то же для контрольной группы испытаний).

разрушения;  $\tau_p$  — время до разрушения;  $N_0$  и  $\tau_0$  — базовое значение долговечности, соответственно.

После обработки экспериментальных результатов и получения искомых коэффициентов  $b_i$  были вычислены теоретические значения остаточной прочности  $\sigma_{ост}^T$  по формуле (1.4), приведенной к виду

$$\sigma_{ост}^T(b_i, T_j) = \Pi(\alpha, \beta, \gamma) \left[ b_0 - b_1 \frac{\sum_{i=1}^{N_{p,\alpha}} N_i}{N_{0,\alpha}} - b_2 \frac{\sum_{i=1}^{N_{p,\beta}} N_i}{N_{0,\beta}} - b_3 \frac{\sum_{i=1}^{\tau_p} \tau_i}{\tau_{0,\gamma}} \right] \quad (1.6)$$

где  $b_0 = \sigma_n$  — предел прочности стеклопластика

$$b_1 = \begin{cases} 9 \text{ кгс/мм}^2, & \varphi = 0^\circ \\ 2 \text{ кгс/мм}^2, & \varphi = 45^\circ \end{cases}, \quad b_2 = \begin{cases} 20 \text{ кгс/мм}^2, & \varphi = 0^\circ \\ 16 \text{ кгс/мм}^2, & \varphi = 45^\circ \end{cases}$$

$$b_3 = \begin{cases} 12 \text{ кгс/мм}^2, & \varphi = 0^\circ \\ 1 \text{ кгс/мм}^2, & \varphi = 45^\circ \end{cases}, \quad \Pi = \begin{cases} 1 & \text{при } \alpha, \beta, \gamma \\ 0.7 & \text{при } \beta, \alpha, \gamma \end{cases}$$

$\Pi(\alpha, \beta, \gamma)$  — коэффициент, учитывающий влияние очередности видов нагружения.

$N_i, \tau_i$  — количество циклов и время действия нагрузки.

$N_{0,\alpha}; N_{0,\beta}; \tau_{0,\gamma}$  — базовое значение долговечности для  $\alpha, \beta$  и  $\gamma$  видов нагружения.

$N_{p,\alpha} = 0.95 N_{0,\alpha}$  — для заданной величины нагрузки.

Определение искомых коэффициентов в уравнении (1.6) осуществляется в соответствии с принятой методикой проведения экспериментов по латинским планам.

Не приводя полностью всех этапов расчета (они известны из литературы по планированию эксперимента), можно дать следующие упрощающие формулы для определения коэффициентов уравнения (1.6):

$$b_1 = - \frac{\sum_1^n \frac{\Delta \sigma_{ост, \alpha \beta \gamma}}{\Delta T_\alpha}}{n}; \quad b_2 = - \frac{\sum_1^n \frac{\Delta \sigma_{ост, \beta \alpha \gamma}}{\Delta T_\beta}}{n}; \quad b_3 = - \frac{\sum_1^n \frac{\Delta \sigma_{ост, \gamma \alpha \beta}}{\Delta T_\gamma}}{n}$$

где  $\Delta \sigma_{ост}$  — приращение (в данном случае — уменьшение) прочности после предварительного нагружения, соответствующее относительному повреждению  $\Delta T$  (например,  $\sigma_{ост,1} \rightarrow T_{\alpha,1}$ ,  $\sigma_{ост,2} \rightarrow T_{\alpha,2}$ ,  $T_{\alpha,2} - T_{\alpha,1} = \Delta T_\alpha$ ),  $n$  — количество образцов на один вид испытания (в данной работе 3, но можно и 1).

Величина коэффициента  $\Pi$ , учитывающего влияние очередности видов нагружения, принимается из условия

$$\sigma \ll \sigma_{T,0} \quad \text{или} \quad \sigma \gg \sigma_{T,0}$$

где  $\sigma$  — напряжение, которое вызывает трещинообразование в композитном материале (для стеклопластиков обычно  $\sigma_{T,0} = 0.50 - 0.65 \sigma_n$ , в зависимости от процентного содержания волокна).

Если известно напряжение  $\sigma_{T,0}$ , то можно не определять экспериментально значение  $\Pi(\beta, \alpha, \gamma)$  и задаться его значением.

Если существуют другие условия, то значения  $\Pi$  могут быть определены экспериментально по формулам

$$\Pi(\beta, \alpha, \gamma) = \frac{\sum_1^k SS_{\beta\alpha\gamma}}{\sum_1^m SS_{\alpha\beta\gamma}}, \quad \Pi(\gamma, \alpha, \beta) = \frac{\sum_1^l SS_{\gamma\alpha\beta}}{\sum_1^m SS_{\alpha\beta\gamma}}$$

где  $\sum_1^m SS_{\alpha\beta\gamma}$  и  $\sum_1^k SS_{\beta\alpha\gamma}$  — сумма результатов всех испытаний (сумма всех значений  $\sigma_{ост}$ ) с очередностью нагружений  $\alpha\beta\gamma$  и  $\beta\alpha\gamma$  соответственно,  $k$ ,  $m$  и  $l$  — количество соответствующих видов испытаний.

Одновременно были произведены расчеты остаточной прочности  $\sigma_{ост}^{T*}$  на основе линейной гипотезы суммирования повреждений, предложенной Пальмгреном [13].

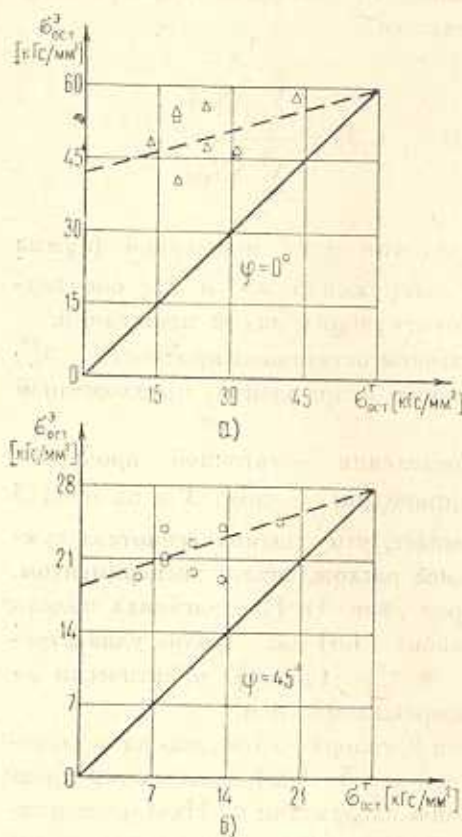
Экспериментальные результаты определения остаточной прочности  $\sigma_{ост}^*$  и расчетные значения  $\sigma_{ост}^T$  и  $\sigma_{ост}^{T*}$  приведены в табл. 3 и на фиг. 3 и 4. Анализ полученных данных показывает, что линейная гипотеза суммирования повреждений дает значительное расхождение с экспериментом. Расхождение может быть до 2 и более раз (фиг. 3). Предлагаемая модель суммирования повреждений на основе закона (1.6) дает вполне удовлетворительное совпадение результатов  $\sigma_{ост}^*$  и  $\sigma_{ост}^T$  (фиг. 4) практически на всем диапазоне уровня относительной повреждаемости  $\eta$ .

Значения полученных коэффициентов  $b_i$  говорят о том, что на остаточную прочность в меньшей степени (в пределах 5—8%) сказывается предварительное нагружение малыми по уровню нагрузками  $\alpha$ . Начальное циклическое нагружение высоким уровнем напряжения  $\beta$  приводит к существенному снижению  $\sigma_{ост}$  (до 30%) ввиду появления на начальной стадии испытаний микротрещин в связующем. С ростом количества циклов предварительного нагружения величина  $\sigma_{ост}$  уменьшается, что в первую очередь связано с разупрочнением связующего и релаксацией напряжений в нем. Это подтверждает также относительно большее падение остаточной прочности  $\sigma_{ост}$  для стеклотекстолита под углом  $\varphi = 45^\circ$ , когда возрастает роль связующего в обеспечении прочности и жесткости образца (фиг. 2). Модуль упругости образцов, испытанных по основе ( $\varphi = 0^\circ$ ) практически остается без изменения (фиг. 1).

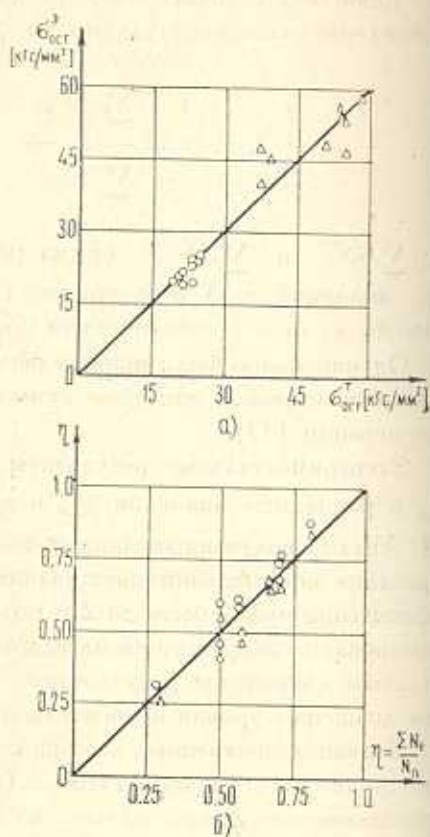
Таким образом, можно заключить, что в условиях предварительного нагружения происходит сложный процесс изменения механических свойств материала, который идет по двум конкурирующим друг с другом направлениям — упрочнению и разупрочнению. В частности, при вибрационном растяжении вблизи предела усталости ( $N = 2 \cdot 10^6$  цикл) механические свойства стеклотекстолита меняются мало, а в условиях длительного статического растяжения (ползучесть) может преобладать как процесс упрочнения, так и разупрочнения. Однако при повторно-статическом растяжении,



имевшем место при весьма значительных уровнях напряжения, естественно, интенсивнее происходит процесс разрушения.



Фиг. 3. Оценка суммирования повреждений по линейной гипотезе. — линейная гипотеза, ---- экспериментальные значения.



Фиг. 4. Оценка суммирования повреждений по предлагаемой модели (1.6).  $\Delta$ ,  $\circ$  — значения остаточной прочности  $\sigma_{ост}^0$  при  $\psi = 0^\circ$  и  $45^\circ$  соответственно. — по теории на основе (6), а — сопоставление значений  $\sigma_{ост}^0$  и  $\sigma_{ост}^T$ , б — влияние исходного уровня повреждаемости  $\eta$ .

Возможность использования модели суммирования повреждений (1.6) для оценки разрушающих нагрузок реальных конструкций была проверена при испытании стыков оболочки из композиционного материала, рассчитанных по условию равнопрочности [14]. Испытания проводились на циклическое нагружение при напряжении  $\sigma_v = 0.65 \sigma_{вр}^1$  и длительное статическое нагружение ( $\approx 40$  час), после чего снимались значения остаточной прочности  $\sigma_{ост}$ . Отклонение  $\sigma_{ост}^0$  от  $\sigma_{ост}^T$ , рассчитанное по (1.6), было в пределах 10–12%, что можно считать вполне приемлемым.

Таблица 3

Результаты расчета по линейной гипотезе и модели (1.6) в  $\text{кгс/мм}^2$ 

№ п/п	Чередование видов нагрузки	$\varphi=0^\circ$			$\varphi=45^\circ$		
		$\sigma_{\text{ост}}^a$	$\sigma_{\text{ост}}^T$	$\sigma_{\text{ост}}^{T^*}$	$\sigma_{\text{ост}}^a$	$\sigma_{\text{ост}}^T$	$\sigma_{\text{ост}}^{T^*}$
1	$\alpha_1 \rightarrow \beta_2 \rightarrow \gamma_3$	55.80	53.9	25.1	22.62	23.5	10.88
2	$\alpha_2 \rightarrow \beta_3 \rightarrow \gamma_1$	48.1	51.0	12.4	19.19	21.7	5.44
3	$\alpha_3 \rightarrow \beta_1 \rightarrow \gamma_2$	53.95	54.1	18.9	23.97	24.7	8.16
4	$\beta_1 \rightarrow \alpha_2 \rightarrow \gamma_3$	45.6	39.5	31.2	23.95	23.5	13.6
5	$\beta_2 \rightarrow \alpha_3 \rightarrow \gamma_1$	40.0	37.3	18.9	20.72	20.8	8.16
6	$\beta_3 \rightarrow \alpha_1 \rightarrow \gamma_2$	47.4	37.2	25.1	19.81	19.8	10.88
7	$\gamma_1 \rightarrow \alpha_2 \rightarrow \beta_3$	58.22	58.3	43.5	24.52	25.3	19.04
8	$\gamma_2 \rightarrow \alpha_3 \rightarrow \beta_1$	46.5	55.4	31.2	19.19	23.5	13.8
9	$\gamma_3 \rightarrow \alpha_1 \rightarrow \beta_2$	54.42	53.4	18.9	21.13	21.7	8.16

Выводы. 1. Рассмотренная совокупность предварительного вибрационного, повторно-статического и длительно-статического растяжения стекло-текстолита независимо от ориентации нагрузки  $\varphi$  в целом мало влияет на характер кривой деформирования при последующем растяжении. По сравнению с контрольными данными (образцов, ранее не подвергшихся силовому воздействию) среднее значение предела прочности и модуля упругости по начальному участку графика  $\sigma \sim \varepsilon$  изменяется незначительно (до 5—10%). Однако в указанных пределах наблюдается определенная связь между остаточной прочностью и модулем упругости, с одной стороны, и очередностью видов, а также продолжительностью предварительного нагружения, с другой. Значительно более ощутимое влияние оставляет повторно-статическое растяжение, менее — вибрационное.

2. Для оценки суммирования повреждений стеклопластиков целесообразно использовать модель, учитывающую очередность и сочетание нагрузок в виде (1.6).

Институт механики  
АН Армянской ССР  
Московский авиационный  
институт

Поступила 29 V 1978

Ե. Ե. ՍԱՐԳՍՅԱՆ, Օ. Ս. ՍԵՐՏՅԱՆ, Վ. Վ. ՎԱՐՈՒԵՅ,  
Մ. Մ. ՄԱՐՏԻՐՈՅԱՆ, Ա. Ե. ՂԱԶԱՐՅԱՆ

ԿՈՄՊՈԶԻՑԻՈՆ ԵՅՈՒԹԵՐԻՅ ԷԼԵՄԵՆՏՆԵՐԻ ԿՎԱԶԻՍՏԱՏԻԿ  
ԵՎ ՓՈՓՈԿՆԱԿԱՆ ԲԵՌՆԱՎՈՐՄԱՆ ԴԵՊՔՈՒՄ  
ՎՆԱՍՎԱՍՔՆԵՐԻ ԳՈՒՄԱՐՈՒՄԸ

Ա մ ֆ ո ֆ ո ի մ

Ուսումնասիրված է նախնական ուժային կոմպլեքսի՝ երկարատև ստատիկ, վերրացիոն և կրկնվող-ստատիկ բեռնվածքների ազդեցությունը ազա-

կետերատիխի մնացորդային ամրության և զեֆորմատիվության վրա: Բացահայտված է մնացորդային ամրության և զեֆորմացիայի կապը նախնական բևեռավորման տեսքից, նրա կիրառման հաշորդականությունից և տևողությունից: Ցույց է տրված, որ վնասվածքների գումարման դժային հիպոթեզը փորձի հետ ապիս է զգալի տարբերություն: Որպես վնասվածքների գումարման մոդել առաջարկված է բազմանդամային կապակցություն, որը հաշվի է առնում նախնական բևեռավորման տեսքերը, նրանց ազդման հերթականությունը և տևողությունը:

## DAMAGE SUMMATION FOR QUASI-STATIC AND VARIABLE LOADING OF ELEMENTS MADE OF COMPOSITIONAL MATERIALS

N. E. SARKISIAN, O. S. SIROTKIN, V. V. VOROBAY,  
M. M. MARTIROSIAN, A. N. KAGRAMANIAN

### S u m m a r y

Examined is the influence of the complex of preliminary force effect (vibrational, repeated-static and prolonged-static) on the residual strength and deformability of fibreglass plastic. The dependence of the residual strength and the module of deformation upon succession and duration of the types of preliminary loading is revealed. The linear hypothesis of damage summation is shown to significantly differ from experiment. Polynomial dependence, taking account of succession and combination of the types of preliminary loading, is suggested as a model.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Freas A. D.* Effect of preloading and fatigue on mechanical properties of glass-cloth plastic laminates. Trans. ASME, May, 1953.
2. *Mattign A., Haferkamp H.* Zum Alterungsverhalten glassfaser-verstärkter Kunststoffe. Kunststoffe, 1962, 52, No. 12.
3. *Гальперин М. Я.* Сопротивление усталости и рассеяние циклической долговечности некоторых стеклопластиков при изгибе. Машиноведение, 1966, № 3.
4. *Иванов О. Н., Валулин А. Х., Невенко В. Ф., Носелиани В. П.* Механические свойства стеклопластика на основе волоконной поллой структуры. Механика полимеров, 1971, № 2.
5. *Саркисян Н. Е.* О влиянии предварительного циклического нагружения на статическую прочность и деформативность стеклопластика. Изв. АН Арм. ССР, Механика, 1973, т. 24, № 1.
6. *Tanimoto Toshio, Amijima Sadao.* Progressive nature of fatigue damage of glass-fiber reinforced plastics. „J. Compos. Mater.“, 1975, No. 9.
7. *Liber T., Dantel I. M.* Effects of tensile load cycling on advanced composite angle-ply laminates. „Proc. 31st. Annu. Conf. Reinforced Plast. Compos. Inst.“, 1976.

8. Захаров В. Н. Влияние циклических нагрузок на статическую прочность стеклопластиков, применяемых в судостроении. В сб. Свойства полимерных стеклопластиков и методы их контроля. Л., Судостроение, 1970, вып. 2.
9. Мартиросян М. М. О ползучести стеклопластика СВМ в ранний период после изготовления материала. Изв. АН Арм. ССР, сер. физ.-мат. наук, 1964, т. 17, № 5.
10. Мартиросян М. М. О кратковременной ползучести стеклопластика СВМ. Механика полимеров, 1965, № 2.
11. Панфёров К. В., Романенков И. Г., Абашидзе Г. С., Никитин В. Н., Аваев Б. С., Шпаковская Е. И. Атмосферостойкость стеклопластиков, находящихся под нагрузкой. Пластические массы, 1968, № 6.
12. Романенков И. Г., Иванов Г. Н. Прочность стеклотекстолита при действии долговременных нагрузок. Пластические массы, 1971, № 10.
13. Schijve, Jacobs F. Research on Cumulative Damage in Fatigue of Riveted Aluminium Alloy Joints. „National Luctvaar laboratorium, Amsterdam Report“, 1956; No. 1999.
14. Сироткин О. С. Проектирование и технология соединений элементов композиционных материалов. Пластические массы, 1976, № 3.