

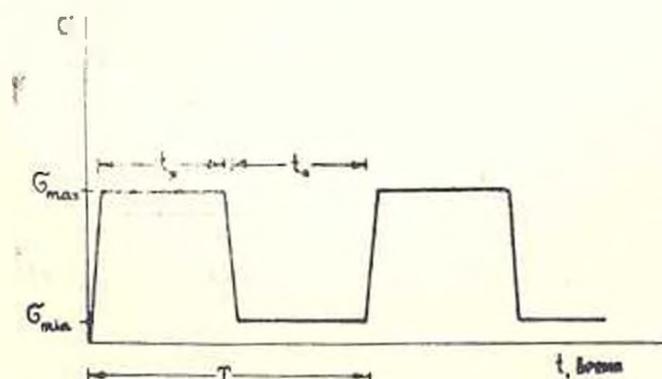
УДК 539.3:678.5.06

## ОСТАТОЧНАЯ ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМАТИВНОСТЬ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ МНОГОКРАТНОМ СТАТИЧЕСКОМ РАСТЯЖЕНИИ-ОТДЫХЕ

САРКИСЯН Н. Е.

Исследование влияния циклического нагружения на прочность и деформативность полимерных композитных материалов при последующем статическом нагружении представляет большой интерес. Однако анизотропия механических свойств материала учитывалась лишь в работах [1—6]. В них не была установлена какая-либо определенная общая закономерность изменения остаточной прочности (или деформативности) в зависимости от величины напряжения или количества циклов предварительного нагружения. Вместе с тем, построены некоторые модели, с помощью которых можно предсказать остаточную прочность композитных материалов после гармонического циклического нагружения [1, 7].

В настоящей работе исследовано изменение прочности и деформативности стекло- и органиоластиков на кратковременное статическое растяжение, когда материал предварительно подвергается многократному трапецидальному циклу растяжения-отдыха по режиму, показанному на фиг. 1. Методика предварительного нагружения описана в работе [8].



Фиг. 1. Форма цикла статического растяжения-отдыха.

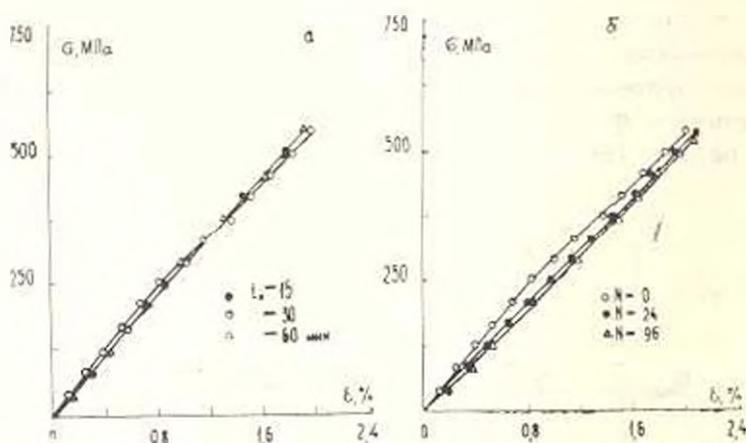
Испытания проводились над стеклопластиком на основе ткани и над однонаправленным органиоластиком, изготовленным на эпокси-дном связующем. Параллельное сравнение экспериментальных данных

позволяет выделять некоторые особенности изменения механических свойств этих материалов, учет которых может быть полезен при проектировании изделий из них.

Влияние трапецидального цикла растяжения-отдыха рассмотрено с точки зрения варьирования продолжительности нахождения образца под нагрузкой и в состоянии условного отдыха, количества циклов нагружения, угла ориентации нагрузки относительно волокон и уровня циклического напряжения.

Испытания однонаправленного органикостеклопластика проведены при напряжениях цикла  $\sigma_{max} = 0,6; 0,7; 0,8$  и  $0,85 \sigma_n$ , где  $\sigma_n$  — предел прочности композита на кратковременное статическое растяжение образца в контрольном состоянии (в отсутствие предварительного нагружения). В зависимости от угла  $\varphi$  вырезки образца циклическое растяжение тканного стеклопластика осуществлялось при напряжениях  $\sigma_{max} = 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,65; 0,7$  и  $0,8 \sigma_n$ , поскольку при более высоких напряжениях предварительного деформирования материал разрушался, не выдержав даже минимальную базу нагружения  $N=24$  циклов.

Итоговые экспериментальные данные по влиянию многократного ( $N=21, 18, 72$  и  $96$  циклов) трапецидального цикла растяжения-отдыха на прочность и деформативность композитов представлены в таблице и, в частности, иллюстрируются графиками, показанными на фиг. 2—4.

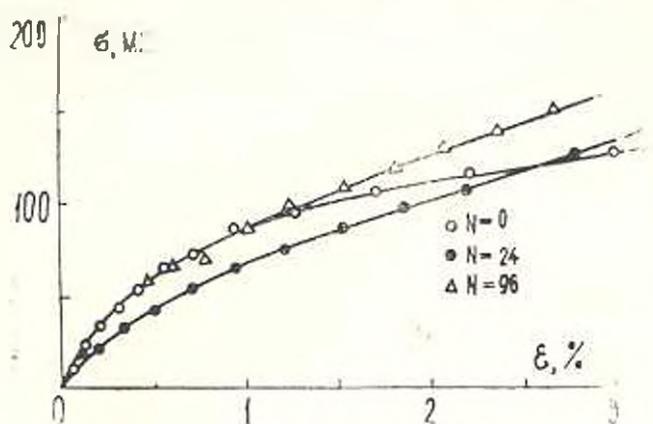


Фиг. 2. Стеклопластик,  $\varphi=0^\circ$ . а —  $\sigma_{max}=0,4\sigma_n$ ; б. —  $\sigma_{max}=0,65\sigma_n$ ,  $t_0=t_1=30$  мин.

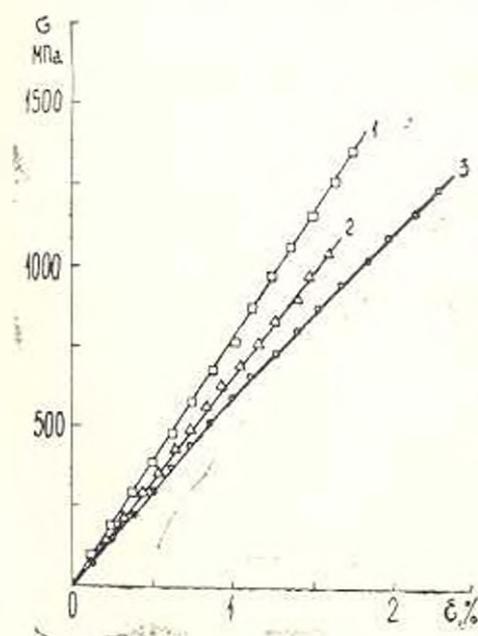
Предварительное нагружение практически не влияет на прочность стекло-жестолита в направлении основы ткани ( $\varphi=0^\circ$ ). При этом не имеют значения временные характеристики трапецидального цикла растяжения-отдыха, а также уровень напряжения и продолжительность циклического нагружения. Таким образом, рассмотренный режим предварительного растяжения в пределах напряжения  $\sigma_{max} =$

$\approx 0,2-0,8 \sigma_n$  не вызывает механических повреждений, которые заметно снижали бы прочность стеклопластика, поскольку при достаточно малом разбросе экспериментальных данных остаточная прочность  $\sigma^*$  в среднем оказалась практически равной прочности материала  $\sigma_n$  в контрольном состоянии.

В направлении утка ткани ( $\eta=90^\circ$ ) изменение прочности в целом также мало и находится в пределах разброса экспериментальных



Фиг. 3. Стеклопластик,  $\alpha=45^\circ$ ,  $\sigma_{\text{норм}}=0,5\sigma_n$ ,  $t_{\text{н}}=t_{\text{к}}=30$  мин



Фиг. 4. Органопластик, графики 1, 2, 3 —

$\sigma_{\text{норм}} = 0,8, 0,65$  и  $0$  (контрольное состояние).

данных. Однако здесь, при небольших уровнях напряжения, может быть отмечена тенденция к уменьшению остаточной прочности в сторону небольшого ее повышения по мере увеличения числа циклов растяжения-отдыха. Это явление более заметно в направлении  $\varphi=45^\circ$ , когда значительно возрастает роль связующего. В этом случае с увеличением напряжения и количества циклов нагружения остаточная прочность может повышаться до 10%. Но в целом она оказывается на 6% ниже, чем прочность в контрольном состоянии.

Таким образом, влияние предварительного циклического растяжения-отдыха определяется углом ориентации нагрузки относительно волокон. С учетом разброса экспериментальных данных прочность стеклопластика в направлениях волокон практически не меняется, а при  $\varphi=45^\circ$  она несколько снижается. В последнем случае, чем выше уровень напряжения, тем относительно меньше снижение остаточной прочности.

В отличие от стеклотекстолита в направлении основы ткани, многократное растяжение с отдыхом однонаправленного органопластика вызывает несколько более заметное уменьшение предела прочности. Однако происходит оно в сторону запаса, то есть в сторону повышения остаточной прочности  $\sigma_2^*$  по сравнению с прочностью  $\sigma_1$ . Независимо от уровня напряжения предварительного циклического нагружения среднее значение остаточной прочности органопластика  $\sigma_2^*$  на 5,4% выше, чем прочность  $\sigma_1$  в исходном состоянии. Вместе с тем, в процентном отношении изменение прочности и границы разброса опытных данных (коэффициент вариации  $v(\sigma_2^*)=5,0\%$ ) находятся на одинаковом уровне. Поэтому в отношении органопластика также можно в целом констатировать достаточно малое изменение прочности вследствие многократного трапецидального цикла растяжения-отдыха.

Рассмотрим влияние многократного трапецидального растяжения-отдыха на изменение деформативных свойств композитов.

На фиг. 2а показаны средние кривые статического растяжения стеклопластика в зависимости от варьирования продолжительности нахождения образца под нагрузкой (время отдыха  $t_0=30$  мин.) Экспериментальные данные указывают на практическое отсутствие какого-либо влияния временного фактора трапецидального цикла нагружения на характер статической кривой «напряжение-деформация» ( $\sigma-\epsilon$ ) в направлении основы ткани. Можно лишь отметить незначительное уменьшение (до 10%) модуля упругости первого линейного участка диаграммы  $\sigma-\epsilon$  и, наоборот, примерно такое же увеличение модуля для второго (конечного) участка графика деформирования (в таблице соответственно значения  $E_1^*$  и  $E_2^*$ ).

На фиг. 2б и 3 показано влияние на остаточную деформативность стеклопластика количества циклов нагружения-отдыха.

Фиг. 2б иллюстрирует влияние числа циклов нагружения на кривую  $\sigma-\epsilon$  при статическом растяжении стеклотекстолита вдоль основы ткани. Повторно-статическое растяжение с отдыхом приводит к прак-

тическому «сглаживанию» переломов на графике зависимости  $\sigma-\epsilon$ , что отражает линейный характер сопротивления деформированию вплоть до разрушения. При этом модуль упругости  $E_1^*$  по сравнению с модулем упругости для контрольного состояния несколько снижается (до 10—15%), причем, как правило, тем заметнее, чем больше число циклов нагружения. По сравнению с модулем упругости  $E_k$  конечного линейного участка диаграммы  $\sigma-\epsilon$  для материала в контрольном состоянии, остаточный модуль  $E_k^*$  не только не снижается, но оказывается даже несколько выше него.

Влияние предварительного нагружения в более рельефном виде выражается при нагружении композита в направлении утка ткани. Здесь модуль  $E_1^*$  может превзойти контрольное значение  $E_1$  до 30% (см. таблицу).

Таблица

Характеристика механических свойств	Стеклопластик			Органопластик $\varphi=0^\circ$
	$\varphi=0^\circ$	$\varphi=45^\circ$	$\varphi=90^\circ$	
$\sigma_{0.2}$ , МПа	535	230	290	1465
$\nu(\sigma_0)$ , %	5.2	8.7	10.1	9.3
$\sigma_0^*$ , МПа	530	217	295	1545
$\nu(\sigma^*)$ , %	4.1	7.5	8.2	5.0
$\epsilon_0^*/\epsilon_0$	0.988	0.941	1.014	1.054
$E_1$ , МПа	30100	10650	21550	58550
$\nu(E_1)$ , %	4.6	5.2	2.9	11.0
$E_1^*$ , МПа	26650	13650	24550	68550
$\nu(E_1^*)$ , %	1.9	14.7	12.7	8.5
$E_0^*/E_1$	0.885	1.282	1.132	1.171
$E_k$ , МПа	24300	1600	13250	48250
$E_k^*$ , МПа	24750	2100	13500	68550
$E_k^*/E_k$	1.019	1.313	1.019	1.421
$\nu_1$	0.135	0.480	0.040	—
$\nu_1^*$	0.080	0.530	0.050	—
$\nu_1^*/\nu_1$	0.6	1.1	1.3	—

Таким образом, многократное растяжение с отдыхом способствует повышению сопротивляемости материала в процессе дальнейшего деформирования. При этом положительный эффект от предварительного силового воздействия увеличивается с уменьшением уровня циклического напряжения.

Особенно большое влияние циклического растяжения-отдыха сказывается в направлении  $\varphi=45^\circ$  (см. таблицу). Повышение модуля упругости начального линейного участка диаграммы  $\sigma-\epsilon$  здесь может достигнуть 60%, а конечного участка (перед разрушением) — более 2 раз. При этом имеет место определенная тенденция изменения остаточного модуля упругости. Так, с увеличением уровня напряжения повышаются также и значения  $E_1^*$  и  $E_k^*$ . По направлению  $\varphi=45^\circ$  рост  $E_k^*$

по сравнению с модулем упругости контрольного состояния в среднем составляет около 30% (см. таблицу).

На фиг. 3 для фиксированного уровня напряжения показано влияние числа циклов нагружения на остаточную деформативность материала. Эти данные вместе с экспериментальными результатами, приведенными в таблице, указывают на неоднозначность и сложность изменения деформативности при  $\varphi = 45^\circ$ . В частности, при определении влияния числа циклов  $N$  играет роль и уровень напряжения. Для сравнительно малых значений напряжения особенно большой эффект повышения модуля упругости наблюдается при нескольких десятках циклов растяжения-отдыха. При более продолжительном предварительном нагружении рост  $E_1^*$  снижается. Между тем, для сравнительно больших напряжений можно констатировать обратное явление.

Настоящее исследование показывает, что в направлении  $\varphi = 45^\circ$  при малых напряжениях и сравнительно непродолжительном нагружении остаточный модуль упругости  $E_2^*$  ниже, чем соответствующее значение  $E_k$  контрольного состояния (на 15%), а при больших напряжениях ( $\sigma \geq 0,4\sigma_k$ ) происходит закономерный рост остаточного модуля упругости, причем тем значительней, чем больше продолжительность циклического растяжения-отдыха.

Таким образом, с ростом числа циклов предварительного нагружения и уровня напряжения происходит определенное изменение модуля упругости  $E_k^*$  в сторону его повышения относительно значения, соответствующего контрольному состоянию материала. Эта тенденция для стеклопластика имеет место при всех рассмотренных углах ориентации нагрузки, но явление становится значительным при  $\varphi = 45^\circ$ .

Рассмотрим влияние трапецидального цикла растяжения-отдыха на статическую деформативность органикостекла.

Прежде всего отметим, что повторно-статическое растяжение с отдыхом по трапецидальному циклу нагружения делает органикостекло более «однородно» сопротивляющимся новому силовому воздействию.

На фиг. 4 это выражается отсутствием переломов на графиках 1 и 2 зависимости  $\sigma - \epsilon$ , причем диаграмма 3 выражает деформативность материала в контрольном состоянии. Приведенные здесь графики показывают, что в процессе рассмотренного предварительного нагружения происходит деформационное упрочнение органикостекла. Это явление имеет остаточный характер. При этом, когда предварительное напряжение не очень большое (диаграмма 2), повышение модуля упругости не столь чувствительно, как при более высоком напряжении (диаграмма 1).

Как показывают экспериментальные данные, зависимость между уровнем напряжения предварительного деформирования и остаточным модулем упругости  $E^*$  не монотонна. До напряжений около  $0,8 \sigma_k$  происходит почти линейный рост модуля  $E^*$ , затем значение остаточного модуля упругости несколько снижается, но, по-прежнему, ос-

гаются выше, чем модуль упругости начального участка кривой для материала в контрольном состоянии. Такой же характер изменения, но при более высоком значении отношения  $E^*/E$ , остаточный модуль упругости имеет при сравнении с контрольной величиной модуля упругости конечного линейного участка диаграммы  $\sigma-\varepsilon$ .

Повышение модуля упругости  $E^*$  в сравнении со средним значением  $E$  по всей диаграмме  $\sigma-\varepsilon$  при напряжениях  $\sigma_{max} = 0,6-0,7 \sigma_b$  составляет 20% (коэффициент вариации  $v(E^*) = 1,3\%$ ), а при  $\sigma_{max} = 0,8-0,85 \sigma_b$  — уже 40% (см. таблицу).

В заключение кратко обсудим влияние трапецидального цикла растяжения-отдыха на величину коэффициента поперечной деформации  $\mu$  стеклопластика при последующем статическом растяжении. При этом учтем сравнительно большую степень разброса экспериментальных данных, который, как известно, вообще характерен для процесса измерения коэффициента поперечной деформации.

По данным приведенной таблицы следует, что рассмотренный режим предварительного нагружения в целом приводит к почти 2-кратному уменьшению коэффициента  $\mu$  в направлении основы ткани, в то время как по углу его значение несколько повышается, а в направлении  $\varphi = 45^\circ$  практически остается неизменным.

Выводы. Многократный повторно-статический трапецидальный цикл растяжения-отдыха незначительно влияет на остаточную прочность стекло- и органикостеклопластиков. Модуль упругости стеклотекстолитов по основе ткани снижается, а по углу  $\mu$ , особенно, под углом  $45^\circ$  значительно повышается. Увеличение модуля упругости органикостеклопластика достигает 30%. Коэффициент поперечной деформации стеклотекстолита в направлении основы ткани уменьшается почти в 2 раза, в то время как под углом  $45^\circ$  практически остается неизменным.

## RESIDUE STRENGTH AND DEFORMATION OF COMPOSITE MATERIAL UNDER MULTIFOLD STATIC STRETCHING-RESTING

N. E. SARKISIAN

ԿՈՄՊՈԶԻՏ ՆՅՈՒԹԵՐԻ ՄԱՅՏՈՐՓԱՅԻՆ ԱՄՐՈՒԹՅՈՒՆԸ ԻՎ ԳԵՏՈՐԲԱՏԻՎՈՒԹՅՈՒՆԸ ԲԱԶՄԱՊԱՏԻԿ ՍՏԱՏԻԿ ԶԳՈՒՄ-ՇՆԱՆՔՍԻ ԳԵՊՔՈՒՄ

Ն. Ե. ՍԱՐԿԻՍԻԱՆ

Ա Վ Փ Ո Փ Ո Մ

Ուսումնասիրված է ապակե և օրգանապլաստների կարճատև ստատիկ ձգման ամրության և դեֆորմատիվության փոփոխությունը, երբ նյութը նախապես ենթարկված է ձգում-շանգատի բազմապատիկ սեղանաձև ցիկլի:

## ЛИТЕРАТУРА

1. Саркисян Н. Е., Саркисян О. С., Воробей В. В., Мартиросян М. М., Казарянцян А. Н. Суммирование повреждений при квазистатическом и переменном нагружении элементов из композиционных материалов.—Изв. АН АрмССР. Механика, 1979, т. 32, с. 64-73.
2. Микелетти М. Я., Гриницкий И. В., Котляков Л. В., Тамуж В. П. Анизотропия разрушения композитов с ортогональной укладкой волокон при малоцикловом нагружении.—Механика композиционных материалов, 1981, № 6, с. 993-999.
3. Стрельцов В. С., Сачковская Л. Л., Байков П. М., Румянцев А. Ф. Закономерности усталостного разрушения углепластиков.—Механика композиционных материалов, 1984, № 5, с. 860-865.
4. Francis Ph. H., Waleath D., Sims D. F., Weed D. N. Biaxial fatigue loading of notched composites.—J. Composites Materials, 1977, v. 11, Oct. p. 488-501.
5. Jann N. Yang, Douglas L. Jones. Statistical fatigue of Graphite Epoxy Angleply Laminates in shear.—J. Composites Materials, 1978, v. 12, Oct., p. 371-389.
6. Thornton H. R., Henriksen M. The effect of load rate on the fatigue life of graphite epoxy composites.—SAME Quart., 1979, v. 10, № 4, p. 1-5.
7. Гайдичук В. Ф., Раствор А. А. К определению остаточной прочности анизотропных материалов после многократного нагружения.—Усталостные характеристики летательных аппаратов, 1977, № 1, с. 126-129.
8. Саркисян Н. Е. Анизотропия циклической деформативности стеклопластиков при растяжении отгибом.—Механика композиционных материалов, 1979, № 6, с. 991-994.

Ереванский политехнический институт

Поступила в редакцию  
30.V.1989