

Н. Э. АРКЕЛИАН

## ВЫНОСЛИВОСТЬ И ДЕФОРМАТИВНОСТЬ ОРИЕНТИРОВАННОГО СТЕКЛОПЛАСТИКА ПРИ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЕ НАГРУЖЕНИЯ

В циклических испытаниях конструкционных материалов на выносливость при заданном нагружении различают два основных режима нагружения —  $P = \text{const}$  и  $\Delta = \text{const}$ . В первом случае в процессе нагружения поддерживается постоянное амплитудное значение нагрузки, приходящейся на образец, и может изменяться деформация, во втором — сохраняется неизменной деформационная характеристика цикла (перемещение) и во времени может изменяться величина прилагаемой нагрузки [1]. В обоих этих случаях процессе нагружения происходит с постоянной во времени частотой изменения  $P$  или  $\Delta$ . Строго сопоставимые данные, очевидно, могут быть получены лишь при соблюдении идентичности условий эксперимента и одинаковости режима циклического нагружения.

В настоящей работе исследовались усталостные свойства ориентированного стеклопластика при высокой частоте нагружения и режиме, при котором в процессе деформирования соблюдается условие  $P = \text{const}$ , но частота нагружения  $n$ , определяемая частотой собственных колебаний образца, может несколько изменяться по мере изменения жесткости образца. Такой режим нагружения и дальнейшем для краткости иногда условно будем называть резонансным.

### § 1. Методика исследования

Опыты проводились на испытательной машине РП<sub>6</sub> — 6 производства ГДР, работающей по резонансному принципу и предназначенной для испытания конструкционных материалов на выносливость при осевой деформации с любым коэффициентом асимметрии цикла  $r$ .

На фиг. 1 показан общий вид испытательной установки.

Образец зажимался в стандартных захватах машины, что обеспечивало надежное крепление его на все время эксперимента.

Контроль нагрузки и асимметрии цикла производился по показаниям пластинчатого элемента силовизмерителя машины.

Независимо от этого параллельный контроль  $P$  и  $r$ , а также измерение продольной деформации осуществлялось по методике [2, 4] с той разницей, что здесь использовалось трехканальное универсальное измерительное устройство (тензостанция) типа УМ-131.

В процессе опыта измерялись частота нагружения, продольная деформация и температура разогрева на поверхности образца.

Частота нагружения и определялась по измерительному прибору машины. Погрешность измерения не превосходила  $1-2\%$ .



Фиг. 1. Общий вид испытательной установки.

Испытаниям подвергался слоистый пластик типа СВМ на эпоксид-фенольном связующем с ортогонально равнопрочной укладкой стекловолокон (СВМ 1:1).

Для исследования влияния анизотропии механических свойств образцы вырезались в направлении волокон и композите ( $\varphi = 0$ ) и в диагональном по отношению к нему направлении ( $\varphi = 45$ ).

Форма и размеры образцов те же, что и в работах [5, 6].

Образцы толщиной 5 мм вырезались вдоль направления волокон и испытывались на растягивающее растяжение ( $r = 0$ ), а толщиной 10 мм — в диагональном направлении и на симметричный цикл нагружения ( $r = -1$ ).

Частота нагружения  $n_0$  в испытаниях стеклопластиков  $\varphi = 0$ ,  $r = 0$  и  $\varphi = 45$ ,  $r = -1$  равнялась соответственно 3000 и 3300 цикл/мин. Разнос в значениях  $n_0$  при переходе от одного образца к другому в каждой серии испытаний не превышал  $1\%$ .

Образцы толщиной 5 мм, имеющие ориентацию  $\varphi = 0$ , были подвергнуты предварительной термической обработке по режиму, описанному в [6]. Вопросы, касающиеся влияния предварительной термообработки образцов на изменение циклической прочности и деформативности испытываемых стеклопластиков при растяжении, были рассмотрены ранее [6].

На каждое значение циклического напряжения испытывалось по 5 образцов.

Усталостные диаграммы построены по корреляционным уравнениям, вычисленным по статистическому методу малого числа измерений [7]. Точки на приведенных кривых соответствуют средним значениям из пяти экспериментальных результатов.

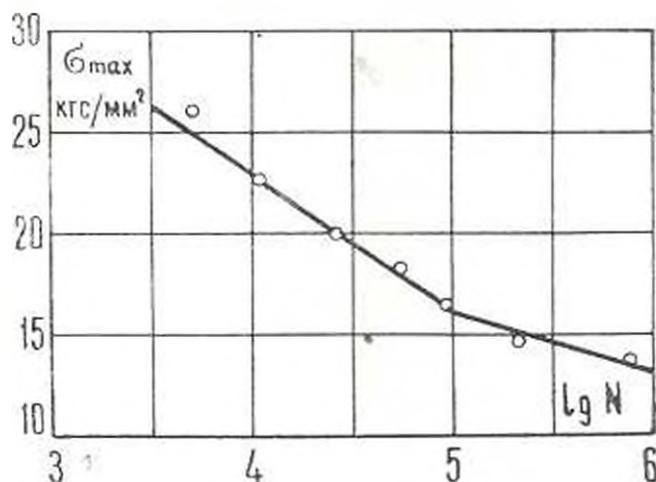
Температура окружающей среды на весь период испытаний была в пределах  $26 \pm 3$  С.

## § 2. Обсуждение результатов испытаний

На фиг. 2 и 3 показаны усталостные диаграммы  $\sigma_c - \lg N$ , которые в полулогарифмической системе координат состоят из двух линейных участков. Линейная зависимость между циклической прочностью и логарифмом выносливости имеет общий вид

$$\sigma_c = a - b \lg N$$

где  $\sigma_c$  — напряжение цикла,  $a$  и  $b$  — параметры, зависящие от свойств испытываемого композита и условий испытания, в частности, от анизотропии механических свойств.

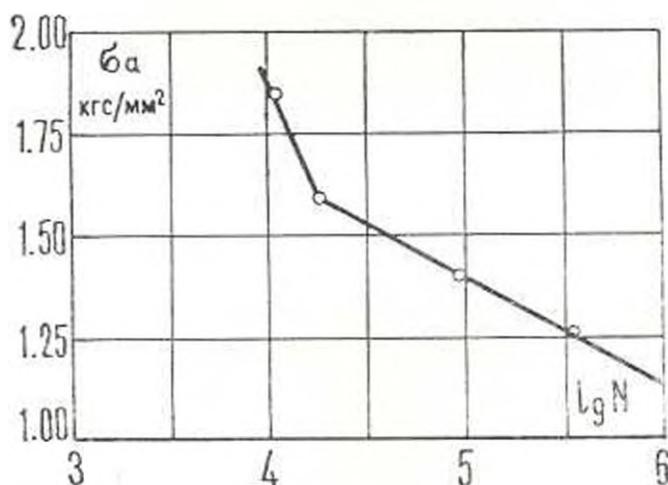


Фиг. 2. Усталостная диаграмма СВММ 1:1,  $\varphi = 0^\circ$ ,  $\gamma = 0$ .

Как и при циклическом нагружении ориентированных стеклопластиков частотой 1200 цикла/мин в режиме  $P = \text{const}$  [3, 5, 6], такое представление соответствует наименьшему отклонению эксперимен-

тальных результатов от графика зависимости, построенного на основе статистического анализа.

Параметр  $b$  в приведенной выше зависимости по своему абсолютному значению является количественной характеристикой сопротивляемости материала циклическим нагрузкам. Чем выше  $b$ , чем больше уклон графика зависимости  $\sigma$  —  $\lg N$ , тем материал более склонен к усталостному разрушению.



Фиг. 3. Усталостная диаграмма СВММ 1:1,  $\varphi = 45^\circ$ ,  $\gamma = -1$ .

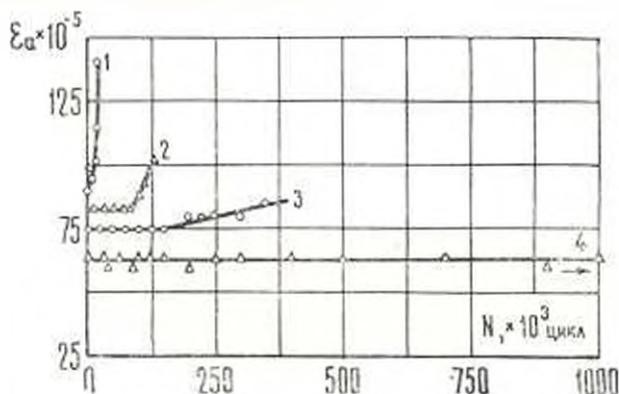
На фиг. 4 показаны кривые изменения амплитудных значений деформаций в процессе длительного циклического нагружения. По характеру они подобны кривым, соответствующим режиму нагружения  $P = \text{const}$  при частоте 1200 *цикл./мин* [4], с той особенностью, что в данном случае имеет место существенная зависимость между напряжением и амплитудной величиной деформации цикла к моменту разрушения образца.

Таблица 1

Стеклопластик	Предел прочности $\sigma$ кгс/мм <sup>2</sup>	Коеф. асимметрии цикла $\gamma$	Цикл. нагруж. соотн. макс. перемещ. уст. напр. кг/мм <sup>2</sup>	Номер участка диаграммы	Параметры и характеристики корреляционного уравнения			
					$a$	$b$	коэфф. коррел.	осн. ошибка критерия линейн.
СВММ 1:1, $\varphi = 0^\circ$	49.85 ± 1.70	0	15.90	1	50.3705	6.8493	-0.9460	0.0652
				2	30.5122	2.9087	-0.8563	0.1342
СВММ 1:1, $\varphi = 45^\circ$	16.80 ± 0.80	-1	1.60	1	6.3295	1.1128	-0.8929	0.2012
				2	2.7186	0.2645	-0.9878	0.0522

Что касается кривых зависимости деформации от количества циклов нагружения при пульсирующем растяжении, то они также по-

добны полученным ранее [4], только в рассматриваемых опытах наблюдается еще более существенный рост деформаций виброползучести, связанный с относительно более высокой температурой разогрева материала в данных испытаниях.



Фиг. 4. Зависимость деформации от напряжения и числа циклов. СВММ 1:1,  $\varphi = 45^\circ$ ,  $r = 1$ ,  $\sigma_0 = 1) 1.55; 2) 1.35; 3) 1.29; 4) 1.10 \text{ кгс/мм}^2$ .

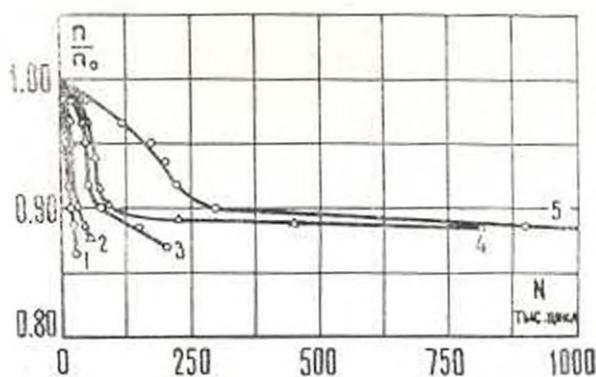
При циклическом нагружении образца посредством машины, работающей по резонансному принципу, частота нагружения  $\omega_0$  определяется частотой собственных колебаний образца. Последняя зависит от жесткости образца, то есть от исходных величин его размеров и модуля упругости материала. Поэтому в процессе нагружения, когда соблюдается режим  $P = \text{const}$ , частота нагружения может изменяться вследствие изменения жесткости образца. Для стекловолоконистых композитов, являющихся разупрочняющимися материалами, это изменение  $\omega_0$  происходит в сторону его уменьшения. Уменьшение резонансной частоты нагружения  $\omega_0$  вызывается двумя причинами [8]: необратимыми изменениями в материале, возникающими вследствие накопления повреждений, и зависимостью модуля упругости материала от температуры.

Ранее в связи с испытаниями стеклопластиков на образцах, вырезанных вдоль направления волокон, было показано, что как в опытах с обычной частотой нагружения  $P = \text{const}$  [9], так и в случаях нагружения со звуковой частотой [8] изменение жесткости образца и резонансной частоты колебания в основном происходит вследствие развития повреждаемости материала, а не повышения температуры образца за счет циклического разогрева.

Поэтому изменение частоты  $\omega$  во времени в определенной мере может служить количественной характеристикой повреждаемости материала. На фиг. 5 приведены некоторые из экспериментальных кривых изменения отношения  $\omega/\omega_0^*$  в зависимости от числа циклов и на-

\* Здесь  $\omega_0$  — начальное значение резонансной частоты циклов, постоянное для всех образцов заданной серии испытаний независимо от величины прикладываемой нагрузки;  $\omega$  — значение частоты в данный момент циклического деформирования, зависящее от числа циклов  $N$  и напряжения  $\sigma$ .

пряжения. Эти кривые свидетельствуют, во-первых, об определенной зависимости резонансной частоты колебания  $n$  от циклического напряжения и продолжительности деформирования  $n$ , во-вторых, что более важно, о наличии некоторого критического значения отношения  $n/n_0$ , по достижении которого независимо от величины напряжения наступает разрушение материала.



Фиг. 5. Изменение резонансной частоты нагружения СВМ 1:1,  $\alpha = 0^\circ$ ,  $\tau = 0$ .  
 $\sigma_{\text{max}}$  1) 19.85; 2) 18.02; 3) 14.58; 4) 11.00; 5) 13.91 кгс/мм<sup>2</sup>.

Как показывает статистический анализ, это видно также из фиг. 5, среднеарифметическая величина критического значения  $(n/n_0)_c$  при пульсирующем растяжении СВМ 1:1 вдоль направления волокон составляет 0.882 и характеризуется коэффициентом вариации  $\approx 2.60\%$  (расчеты соответствуют 28 испытаниям).

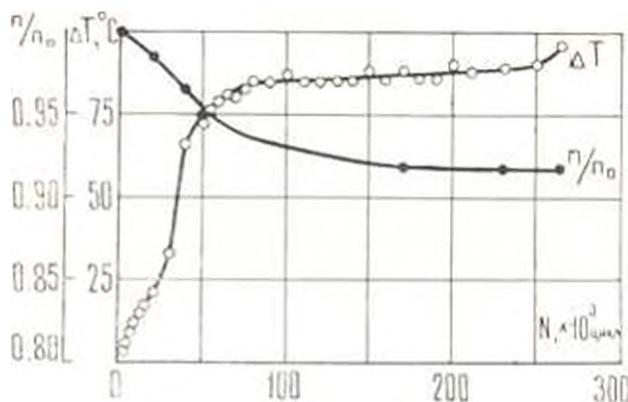
Иная картина наблюдается при испытании образцов, вырезанных в диагональном по отношению к волоконному направлению. Здесь при симметричном растяжении-сжатии, на всем интервале  $10^3 - 10^6$  циклов деформирования, практически во всех опытах начальное значение резонансной частоты с течением времени сохраняется неизменным, т.е. есть при разрушении соблюдается условие  $(n/n_0)_c = 1.000$ . Такое явление может свидетельствовать в пользу того, что в этих случаях нагружения разрушение происходит преимущественно из-за растрескивания материала, без заметного накопления повреждаемости.

Экспериментальное исследование относительного изменения модуля упругости СВМ 1:1,  $\alpha = 0^\circ$ , в функции от температуры и случае статического растяжения выявило слабую линейную зависимость модуля  $E$  от температуры  $T$  вплоть до температуры стеклования полимерного связующего ( $\approx 90^\circ\text{C}$ ), при которой  $E/E_0 \approx 0.95$  где  $E_0$  — модуль упругости при комнатной температуре [10, 11].

На фиг. 6 для иллюстрации показана еще одна опытная кривая изменения параметра повреждаемости  $d_{\text{пл}}$ . Там же приведена

\* Лишь в относительно небольшом числе опытов величина  $d_{\text{пл}}$  впоследствии уменьшилась. Однако, это изменение в количественном отношении оставалось в пределах точности измерения.

и соответствующая кривая разогрева, отражающая изменение температуры разогрева на поверхности образца в его опасном сечении. Как показывают экспериментальные данные, что видно также и по кривым на фиг. 5 и 6, повреждаемость образца в основном различается на начальной стадии циклического деформирования, когда температура



Фиг. 6. Изменение относительной частоты  $n$  и температуры разогрева  $\Delta T$ , СВМ 1:1,  $\varphi = 0^\circ$ ,  $\sigma = 0$ ,  $\tau_{\text{цикл}} = 11,68 \text{ мкс/мм}^2$ ,  $\Delta T_0 = 265,0 \text{ К}$  цикл,  $T_0 = 26^\circ \text{C}$ .

разогрева еще не достигла своего максимального, более или менее стабильного по времени, значения. Относительная протяженность этой стадии утомления материала составляет  $\sim 0,15 - 0,5 N_0$  и зависит от величины напряжения (выносливости) композита и укорачивается с его уменьшением. По графикам  $\Delta T - N$  на соответствующих участках выносливости температура разогрева растет с возрастающей скоростью, но, как было отмечено, по своей величине  $T$  еще не достигает своего максимального стабильного значения. Непосредственно перед разрушением образца снова наблюдается повышение скорости роста температуры разогрева и новое, но уже небольшое, падение значения  $n/n_0$ . Отсюда можно заключить, что в случае циклического растяжения композита вдоль направления волокон суммарная повреждаемость материала перед разрушением большей частью является результатом механического разупрочнения, а не размягчения материала.

**Выводы.** 1. При циклическом деформировании ориентированного стеклопластика СВМ частотой  $\sim 3000$  цикл/мин зависимость между напряжением и выносливостью в полулогарифмической системе координат имеет линейный характер, как и при частоте нагружения 1200 цикл/мин.

2. Несущая способность композита в рассматриваемых условиях деформирования исчерпывается при определенном изменении начального значения частоты нагружения независимо от приложенного напряжения.

3. По экспериментальным результатам можно заключить, что при пульсирующем растяжении стеклопластика вдоль волокон стеклопласт-

стик разрушается хрупко, а при симметричном цикле растяжения — сжатия в диагональном направлении потеря работоспособности материала происходит прежде всего из-за размягчения материала.

Институт механики  
АН Армянской ССР

Поступила 25 X 1973

Ն. Ե. ՍԱՐԿԻՍԻԱՆ

ԿՈՎԱՆՈՐՈՇԵԼԱՆ ԱՊԱԿԵՊԼԱՍՏԻՆԵՐԻ ԳԻՄՍԿԻՆԵՐԻԹՅՈՒՆԸ  
ԵՎ ԳԵՂՈՐԴՄԵՏԻԿԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆԸ ԲԵՌՆԱՎՈՎՈՐՄԱՆ ԲՎՐՁՐ ՀՍՃԱՆԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ  
ԳԵՊԲՈՒՄ

Ս. մ փ ո փ ու մ

Ուսումնասիրվել է էպոքսի-ֆենոլային խեժի վրա պատրաստված (CBAM) տիպի արվողոնայ նավասարամուր ապակեպլաստի նոզնածային նատկու-վյունները թելիկների ուղղությամբ բարախող ձգման և թելիկների նկատմամբ անկյունազծային ուղղությամբ սիմետրիկ ձգման-սեղման դեպքում: Քննա-վորման ցիկլերի նամախականությունը նամապատասխանել է 3000 և 3300 ցիկլ/րոպե:

Էքսպերիմենտայ արդյունքներից նկատում է, որ թելիկների ուղղությամբ ձգվելից բևնավորման դեպքում ապակեպլաստի բայրայումը կրում է առավել-յապես մեխանիկական բնույթ, իսկ թելիկների նկատմամբ անկյունազծային ուղղությամբ կրողունակության կորուստը առաջին ներքին տեղի է սնենում նյութի ջերմային փոփոխման պատճառով:

DURABILITY AND DEFORMABILITY OF ORIENTED  
FIBREGLOSS PLASTICS UNDER HIGH FREQUENCY LOADING

N. E. SARKISIAN

S u m m a r y

The fatigue characteristics of orthogonally equistrong fibreglass plastics of the „CBAM“ type under symmetric cycles of tension-compression, pulsating along fibres in the direction diagonal to the latter, are examined.

The frequency of loading cycles is 3000 and 3300 cycles/min respectively.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Бекш Т. А., Шнейдерович Р. М. Методы оценки прочности при малом числе циклов нагружения. Заводская лаборатория, т. XXX, № 12, 1964.
2. Олдырев П. П. Исследование деформативных свойств, рассеяния энергии и разрушения жестких полимерных материалов при длительном циклическом нагружении. Автореферат канд. дисс., Рига, 1968.
3. Саркисян Н. Е. Прочность и деформативность стеклопластиков типа СВМ при циклическом осевом нагружении. Изв. АН Арм. ССР, Механика, т. XXIII, № 6, 1969.
4. Саркисян Н. Е. Анизотропия статической и циклической деформативности стеклопластиков типа СВМ. Изв. АН Арм. ССР, Механика, т. XXIV, № 3, 1971.
5. Саркисян Н. Е. Анизотропия усталостной прочности стеклопластиков типа СВМ. Изв. АН Арм. ССР, Механика, т. XXIV, № 2, 1971.
6. Саркисян Н. Е. О влиянии термической обработки на усталостные свойства нетканого стеклопластика. Изв. АН Арм. ССР, Механика, т. XXV, № 5, 1972.
7. Митропольский А. К. Техника статистических вычислений. Физматгиз, М., 1961.
8. Анидзе Р. П., Скалозуб С. А., Уржумцев Ю. С. Усталость стеклопластика при звуковых частотах колебаний. Механика полимеров, № 6, 1972.
9. Олдырев П. П., Тамуж В. П. Изменение свойств стеклотекстолита при циклическом растяжении-сжатии. Механика полимеров, № 5, 1967.
10. Замбахидзе Д. В., Рабинович А. А. Влияние температуры и анизотропии на упругие константы ориентированных стеклопластиков. Механика полимеров, № 6, 1968.
11. Клягичков Е. П., Зверев А. Н. Исследование механических характеристик стеклопластика типа СВМ в условиях пониженных и повышенных температур. В кн.: Физико-химия и механика ориентированных стеклопластиков. Наука, М., 1967.