

Н. Е. САРКИСЯН

АНИЗОТРОПИЯ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ ТИПА СВАМ

Анизотропия усталостной прочности стеклопластиков изучена мало. Имеющиеся сведения [1, 2] о характере поведения отечественных материалов получены в основном при изгибе в режиме „жесткого“ нагружения, когда в процессе циклического деформирования сохраняется неизменным амплитудное значение прогиба образца. Влияние анизотропии на усталостную прочность рассмотрено при симметричном растяжении-сжатии тканевых стеклопластиков [3-4] и стеклопластика типа СВАМ на связующем БФ-4 [5].

В настоящей работе исследовалось влияние анизотропии на усталостную прочность стеклопластиков типа СВАМ при длительном осевом циклическом деформировании в режиме „мягкого“ нагружения при различных асимметриях цикла.

§ 1. *Методика исследований и результаты статических испытаний.* Общая часть методики экспериментов описана в работе [5]. Здесь освещаются некоторые вопросы, относящиеся конкретно к данному исследованию.

Испытаниям подвергались стеклопластики типа СВАМ на эпокси-фенольном связующем, изготавливаемые на Ленинградском заводе слоистых пластиков. Укладка стекловолокон в материале в двух взаимно перпендикулярных направлениях была 1:1 и 5:1. Образцы вырезались из листов толщиной 10 мм и имели форму двухсторонней лопаточки размерами рабочего участка 10-15-15 мм. Радиус перехода к головкам образца составлял 100 мм при вырезке образца вдоль осей упругой симметрии материала ($\varphi = 0^\circ$ и $\varphi = 90^\circ$)* и 50 мм при вырезке и в промежуточных направлениях.

Для определения статических прочностных характеристик испытывалось по 5 образцов. Статическая прочность стеклопластиков при растяжении определялась на машине ЦДМ-10, а испытания на сжатие проводились на гидропульсаторе ЦДМПу-10. Для определения предела прочности на сжатие использовались также образцы, рекомендуемые ГОСТ-4651-63. Они имели форму прямого бруска со стороной квадратного основания 10 мм и высотой 15 мм. Результаты испытаний, а также коэффициенты вариаций полученных величин приведены в табл. 1. Следует отметить, что предел прочности на сжатие, определенный по стандартному образцу, как правило, оказывается за-

* Угол φ отсчитывается от направления наибольшей укладки волокон

ниженным по сравнению с результатом испытания образца, имеющего форму двухсторонней лопаточки. Причиной этого является преждевременное расслоение материала в стандартном образце (отделение стеклошпонов друг от друга) при приложении сжимающей нагрузки параллельно слоям армирования. Особенно заметное снижение предела прочности на сжатие (на 12,7%) имеет место для СВМ 5:1, когда сжимающая нагрузка прикладывается вдоль главного направления армирования ($\varphi = 0$). Приводимые в табл. 1 пределы прочности на сжатие соответствуют испытаниям образцов, имеющих форму двухсторонней лопаточки.

Таблица 1

Ориентация образца φ , град	Прочность на растяжение		Прочность на сжатие	
	$\sigma_{\text{рр}}$, кгс/мм ²	ν , %	$\sigma_{\text{сж}}$, кгс/мм ²	ν , %
СВМ 1:1				
0	48.00	1.18	36.05	2.29
15	30.40	2.08	25.15	3.05
30	18.45	5.80	16.20	1.53
45	16.80	4.68	14.35	2.63
СВМ 5:1				
0	67.55	1.32	19.50	5.03
45	14.25	4.91	11.05	1.80
90	22.20	2.72	22.05	2.47

Усталостные испытания проводились на гидропульсаторе ЦДМПу-10, работающем в режиме „мягкого“ нагружения. Частота нагружений составляла 1200 цикл/мин. База испытаний была принята равной 10^6 циклам.

Влияние анизотропии механических свойств на усталостную прочность стеклопластика СВМ 1:1 исследовалось при четырех значениях угла ориентации плоскости циклического деформирования относительно направления главных осей упругой симметрии материала $\varphi = 0^\circ$ ($= 90^\circ$), $\varphi = 15^\circ$ ($= 75^\circ$), $\varphi = 30^\circ$ ($= 60^\circ$) и $\varphi = 45^\circ$. Испытания проводились для трех значений коэффициента асимметрии цикла $r = \frac{\sigma_{\text{мин}}}{\sigma_{\text{макс}}}$: а) симметричное растяжение-сжатие ($r = -1$), б) пульсирующее растяжение ($r = 0$), в) пульсирующее сжатие ($r = -\infty$). Стеклопластик СВМ 5:1 испытывался в циклах симметричного растяжения-сжатия при действии циклической нагрузки вдоль осей упругой симметрии ($\varphi = 0^\circ$ и $\varphi = 90^\circ$) материала и в диагональном направлении ($\varphi = 45^\circ$).

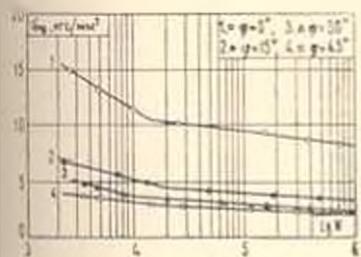
При выносливости материала до $N = 200 - 300$ тыс. циклов испытывалось по 3 образца, при больших выносливостях — по 2 образца. Наконец, в каждой серии при определенном напряжении испытывалось по одному образцу, выносливость которых превосходила принятую базу испытания. Эти испытания проводились для контроля и при построении усталостных кривых не учитывались. Для данного исследования всего было испытано 440 образцов, из них 105 ушло на статические испытания.

§ 2. Зависимость выносливости от циклического напряжения. Как показывают результаты статистической обработки в данном исследовании, при циклическом осевом нагружении стеклопластиков типа СВММ зависимость между усталостной прочностью и логарифмом выносливости может быть представлена двумя линейными участками для всех случаев асимметрии цикла и произвольной анизотропии стеклопластика. Линейная зависимость имеет вид

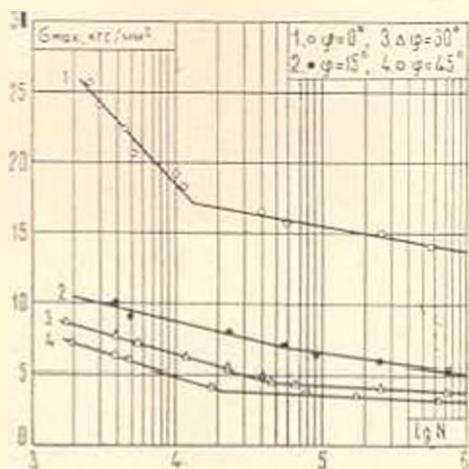
$$\lg N = a - dr, \quad (1)$$

где a — амплитудное или максимальное (минимальное) значение напряжения цикла; r — коэффициент асимметрии цикла; a и d — параметры, определяемые статистическим анализом.

Следует отметить, что ни в одной из серий испытаний не был обнаружен истинный предел выносливости стеклопластика на базе $N = 10^6$ циклов.



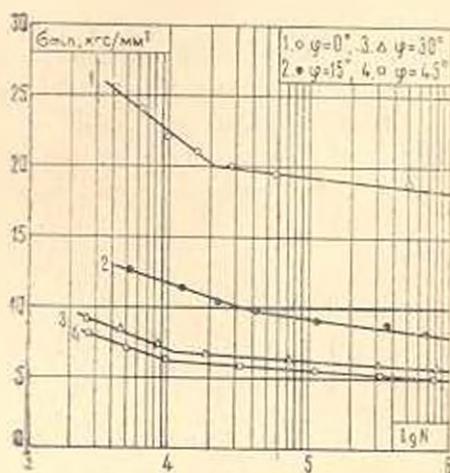
Фиг. 1. Усталостные диаграммы стеклопластика СВММ 1:1 при асимметричном растяжении-сжатии ($r = -1$).



Фиг. 2. Усталостные диаграммы стеклопластика СВММ 1:1 при пульсирующем растяжении ($r = 0$).

* Статистическая обработка проводилась по методике, предложенной для случая малого числа испытаний [6].

Графики зависимости $\sigma_r - \lg N$ имеют четко выраженную точку перелома*, наличие которой, по-видимому, свидетельствует об особенностях процесса разрушения и различиях в степени их интенсивности на разных участках кривой выносливости материала. Точке перелома линейной зависимости соответствует выносливость материала $N \sim 10 - 25$ тыс. циклов (исключение составляют случаи пульсирующего растяжения образцов, вырезанных под углом $\varphi = 15^\circ$ и $\varphi = 30^\circ$ при которых перелом наблюдается при сравнительно больших числах N). Если рассматривать амплитудные значения асимметричных циклов напряжения, то усталостная прочность, соответствующая перелому на диаграмме, мало зависит от того осуществляется симметричный цикл нагружения или пульсирующее сжатие (хотя в последнем случае она на несколько процентов ниже). Когда же прикладываются циклы пульсирующего растяжения, снижение усталостной прочности оказывается существенным (на $20 - 35\%$).



Фиг. 3. Усталостные диаграммы стеклопластика СВАМ 1:1 при пульсирующем сжатии ($r = -\infty$).

В табл. 2 приведены значения параметров a и d , циклическая прочность, соответствующая точке перелома диаграммы $\sigma_r - \lg N$, а также коэффициент корреляции и доверительные границы колебания средних значений при вероятности $P = 95\%$. На фиг. 1—4 показаны графики зависимости выносливости от циклического напряжения для стеклопластиков СВАМ 1:1 и СВАМ 5:1 для различных случаев асимметрии цикла. На диаграммах кружочками обозначены средние значения, полученные из опытов при одном и том же уровне напряжения. Графики построены по корреляционным уравнениям, вычисленным по неосредненным результатам.

* Точка перелома не наблюдалась в [3, 4] при симметричном растяжении-сжатии стеклотекстолита по направлению основы.

Таблица 2

Ориентация образцов β , град	Цикл напряг. точки перелома диаграммы кгс/см ²	Номер участка диаграммы	Параметры и характеристики корреляционного уравнения					Коэффициент уст. прочн. при $N = 10^6$ цикл.	
			a	d	Коэффициент корреляции	Довер интерв. от ср. значения при $P = 95\%$		$K = \frac{\sigma_r}{\sigma_n}$	
						по уст. прочн. кгс/мм ²	по логар. выноса		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	

Симметричное растяжение-сжатие СВМ 1:1

0	10.70	1	5.8813	0.1650	-0.9820	1.1103	0.1866	0.17
		2	12.2749	0.7697	-0.9131	0.5008	0.4222	
15	4.50	1	6.2685	0.4265	-0.9802	0.5466	0.0238	0.11
		2	10.4570	1.3520	-0.9155	0.2491	0.3682	
30	3.80	1	5.4322	0.3889	-0.9399	0.2881	0.1193	0.13
		2	9.7122	1.5222	-0.9634	0.2208	0.3489	
45	3.00	1	6.8963	0.8799	-0.9396	0.2693	0.2522	0.13
		2	10.8600	2.2136	-0.9487	0.1581	0.3690	

Симметричное растяжение-сжатие СВМ 5:1

0	10.40	1	5.3532	0.1182	-0.9335	1.8349	0.2322	0.10
		2	9.8536	0.5533	-0.9973	0.8575	0.4757	
45	2.30	1	5.8454	0.7570	-0.9640	0.2856	0.2243	0.10
		2	9.5942	2.3889	-0.9131	0.1413	0.3697	
90	4.20	1	4.9620	0.2144	-0.9023	1.2200	0.2899	0.10
		2	8.2636	1.0018	-0.9003	0.3517	0.3914	

Пульсирующее растяжение СВМ 1:1

0	17.10	1	5.6262	0.0887	-0.9361	1.4353	0.1360	0.28
		2	13.4148	0.5443	-0.9544	0.6542	0.3731	
15	6.75	1	7.7323	0.4268	-0.9688	0.6728	0.3256	0.17
		2	9.6161	0.7050	-0.8872	0.3468	0.2838	
30	4.50	1	6.3183	0.3586	-0.9696	0.6169	0.2282	0.20
		2	12.8261	1.8261	-0.8516	0.1963	0.4198	
45	4.20	1	5.6175	0.3258	-0.9576	0.5162	0.1756	0.19
		2	11.5052	1.7237	-0.9660	0.1616	0.3710	

Пульсирующее сжатие СВМ 1:1

0	19.80	1	7.1283	0.1391	-0.9617	1.1213	0.1622	0.51
		2	23.9976	0.9883	-0.8564	0.4206	0.4854	
15	9.80	1	7.6454	0.3152	-0.9591	0.6800	0.2234	0.32
		2	12.3239	0.7921	-0.9139	0.4304	0.3730	
30	6.70	1	5.8565	0.2674	-0.9807	0.8081	0.2203	0.35
		2	16.6445	1.8574	-0.9325	0.2096	0.4173	
45	6.10	1	5.8469	0.3014	-0.8779	0.6232	0.2140	0.34
		2	14.0461	1.3679	-0.9966	0.2871	0.4719	

Анализ результатов испытаний показывает, что при пульсирующих циклах нагружения имеют значение как знак среднего напряжения цикла, так и ориентация плоскости циклического деформирования относительно осей упругой симметрии материала. Во всех случаях при положительном среднем значении напряжения выносливость материала существенно ниже, причем эффект этот в большей мере проявляется в случаях нагружения под углом к направлению армирования. Наоборот, деформирование стеклопластика в циклах пульсирующего сжатия приводит к повышению выносливости его при тех же средних значениях циклического напряжения. В последнем случае также сравнительно большее повышение выносливости наблюдается при деформировании материала в направлениях, отличных от направления армирования. Заметна также роль продолжительности циклического нагружения, увеличение которой делает еще более существенной разницу в значениях усталостной прочности.

Таким образом, в зависимости от знака среднего напряжения вызывает повышение или понижение усталостной прочности. Указанное явление можно качественно объяснить особенностями работы связующего в циклах пульсирующего растяжения и сжатия. В случае пульсирующего сжатия связующее повышает прочностной ресурс стеклопластика, так как оно лучше сопротивляется внешним нагрузкам при сжатии, чем при растяжении. Доля участия связующего в работе материала возрастает при нагружении его под углом к направлению стекловолокон. Заметим, что явление снижения усталостной прочности при изменении среднего напряжения от сжимающего на растягивающее наблюдается и при испытаниях металлов (см., например, [7]).

Экспериментально установленный факт более высокой усталостной прочности стеклопластиков при пульсирующем сжатии по сравнению с растяжением, наблюдаемый независимо от свойств анизотропии, представляет интерес для выяснения поведения материала под нагрузкой, так как при статическом кратковременном и длительном нагружении, как известно [8, 9], имеет место обратное явление.

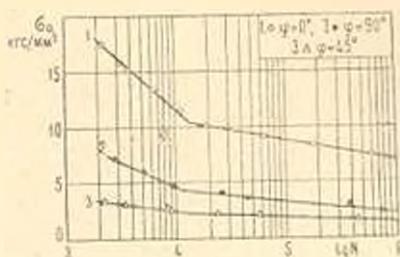
Влияние анизотропии механических свойств на выносливость материала можно оценить с помощью коэффициента усталостной прочности

$$K = \frac{\sigma_c}{\sigma_{\text{ст}}} \quad (2)$$

где σ_c — амплитудное или максимальное (минимальное) значение напряжения цикла, $\sigma_{\text{ст}}$ — предел прочности при статическом растяжении (сжатии).

На базе $N = 10^6$ циклов при нагружении стеклопластика СВМ 1:1 параллельно направлению волокон коэффициент усталостной прочности для всех видов осевой деформации выше, чем при $\varphi = 0^\circ$ (см. табл. 2). Сравнительно меньшее значение коэффициент K принимает при $\varphi = 15^\circ$, что можно объяснить наблюдающимся более силь-

ным разогревом материала в этом направлении. Из данных, приведенных в табл. 2, также видно, что коэффициент усталостной прочности остается практически неизменным в случаях циклического деформирования под углом к направлению волокон.



Фиг. 4. Усталостные диаграммы стеклопластика СВМ 5:1 при симметричном растяжении-сжатии ($r = -1$)

При симметричном растяжении-сжатии коэффициент усталостной прочности влияет также укладка волокон. Усиление анизотропии в одном направлении (стеклопластик СВМ 5:1) приводит к уменьшению величины K , которая оказывается практически одинаковой для углов $\varphi = 0^\circ$, $\varphi = 45^\circ$ и $\varphi = 90^\circ$.

Числовое значение коэффициента K зависит от вида осевой деформации. Оно выше при пульсирующих циклах нагружения (особенно при сжатии) и становится минимальным для симметричного цикла напряжений. Если учитывать только переменную часть циклического напряжения, то определяемый по (2) коэффициент K для $r=0$ ниже, чем при $r = -1$.

Влияние анизотропии механических свойств и вида осевой деформации на усталостную прочность стеклопластика СВМ 1:1 при $N = 10^6$ циклов иллюстрируется на фиг. 5, где кружочками показаны амплитудные значения циклического напряжения, максимальные и минимальные напряжения соответственно для асимметрий цикла $r = -1$, $r = 0$ и $r = -0.5$.

§ 3. Изменение свойств анизотропии СВМ под влиянием длительного циклического деформирования. Стеклопластики проявляют высокую чувствительность по отношению к направлению внешней нагрузки. При циклическом нагружении она выражена гораздо сильнее, нежели при статическом.

Чувствительность стеклопластика к анизотропии прочности можно охарактеризовать коэффициентом степени анизотропии [5], определяемым как частное от величины прочности при данном угле нагружения (σ^φ) и соответствующей прочности при $\varphi = 0^\circ$

$$\psi = \frac{\sigma^\varphi}{\sigma^0} \quad (3)$$

где ψ — коэффициент степени анизотропии прочности.

Как показывают результаты опытов, коэффициент степени анизотропии усталостной прочности при фиксированных прочих условиях испытания находится в определенной зависимости от вида деформации и продолжительности циклического деформирования

$$\psi = \psi(r, N) \quad (4)$$

Наличие зависимости (4), в общем, свидетельствует об изменчивости механических свойств материала, имеющих место в процессе длительного циклического нагружения. Поэтому поверхность усталостной прочности стеклопластика, построенная для сложного или плоского напряженного состояния, с изменением продолжительности циклического нагружения будет изменяться непропорционально. В пользу этого говорят приведенные в табл. 3 значения коэффициента степени анизотропии статической и усталостной прочности. Независимо от вида деформации коэффициент ψ уменьшается с увеличением длительности циклического нагружения. С изменением угла φ направления прилагаемой нагрузки от 0° до 45° эффект уменьшения ψ слабеет. Изменение свойства анизотропии прочности в большей мере наблюдается при пульсирующем растяжении, чем при симметричном цикле нагружения. Еще в меньшей степени оно выражено в случае пульсирующего сжатия. Усиление армирования в одном направлении (стеклопластик СВАН 5:1), почти не меняя свойства анизотропии при $\varphi = 45^\circ$, приводит к заметному повышению значения ψ для перпендикулярного направления ($\varphi = 90^\circ$). Однако, с увеличением длительности нагружения величина ψ снова уменьшается. Отношение коэффициентов степени анизотропии статической и усталостной прочности на базе $N = 10^6$ циклов находится в пределах 1.30 — 1.80 в зависимости от асимметрии цикла и ориентации нагрузки относительно осей упругой симметрии материала.

Экспериментальное исследование анизотропии усталостной прочности сопряжено с большими затратами средств и времени на их проведение. Поэтому важно установить надежную зависимость между усталостной прочностью в направлениях осей упругой симметрии материала и промежуточных направлений. В качестве подобной зависимости часто используется формула [1], полученная для статической прочности анизотропного тела на основе тензоральной зависимости упругих характеристик материала от преобразования системы координат. Зависимость усталостной прочности от угла направления циклической нагрузки имеет вид

$$\psi = \frac{a}{\cos^2\varphi + b\sin^2\varphi + c\sin^4\varphi} \quad (5)$$

где параметры b и c должны быть определены на основе экспериментально полученных значений усталостной прочности стеклопластика в направлениях осей упругой симметрии и диагонального направления

$$b = \frac{\sigma_r^b}{\sigma_r^{1/4}} = \frac{c+1}{4}, \quad c = \frac{\sigma_r^c}{\sigma_r^{5/4}}$$

Справедливость зависимости (5) для определения усталостной прочности стеклопластика экспериментально была проверена, по-видимому, только в работе [5], при симметричном растяжении—сжатии СВМ 1:1 на связующем ВФ-4, $\varphi = 22.5$. Экспериментальные результаты данной работы позволяют более глубоко проверить возможность использования известных зависимостей статической прочности в условиях циклического нагружения материала, в частности, рассмотреть также влияние асимметрии цикла напряжений.

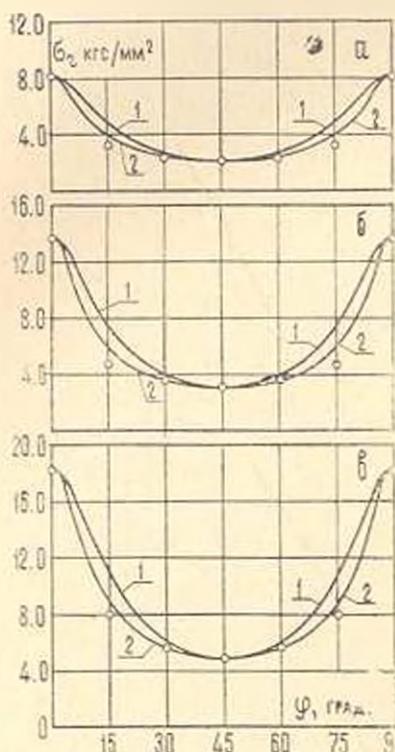
Таблица 3

Ориентация образца γ , град	при стати- ческом на- гружении	при выносливости N циклов				
		10^4	$5 \cdot 10^4$	10^5	$5 \cdot 10^5$	10^6
СВМ 1:1, $r = -1$						
0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
15	0.633	0.468	0.433	0.426	0.412	0.405
30	0.385	0.328	0.334	0.327	0.308	0.300
45	0.350	0.290	0.282	0.280	0.273	0.270
СВМ 5:1, $r = -1$						
0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
45	0.211	0.204	0.220	0.219	0.217	0.216
90	0.328	0.392	0.382	0.372	0.342	0.323
СВМ 1:1, $r = 0$						
0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
15	0.633	0.468	0.432	0.417	0.374	0.353
30	0.385	0.332	0.299	0.278	0.276	0.275
45	0.350	0.271	0.247	0.244	0.238	0.234
СВМ 1:1, $r = -\infty$						
0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
15	0.698	0.515	0.495	0.481	0.453	0.439
30	0.451	0.302	0.330	0.326	0.319	0.315
45	0.398	0.274	0.292	0.287	0.275	0.270

Наряду с (5), здесь проверялась также зависимость (6), выведенная в работе [10] на основе теории малых упруго-пластических деформаций:

$$\sigma^2 = \frac{A}{1 - \cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi - B \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi} \quad (6)$$

где σ^0 и σ^{90} — пределы статической прочности материала в направлениях осей упругой симметрии материала, параметр $\lambda = \sigma^{90}/\sigma^0$, B — параметр, который находится, если известен предел прочности в каком-либо направлении (здесь B определялся по экспериментальному результату при $\varphi = 45^\circ$).



Фиг. 5. Анизотропии усталостной прочности стеклопластика СВМ 1:1 при $N = 10^6$ циклов: 1. рассчитанная по формуле (5), 2. — по формуле (6), а) $r = 1$, б) $r = 0$, в) $r = \infty$.

Как показывает анализ опытных данных, статическая прочность стеклопластика СВМ 1:1 на растяжение и сжатие по выражениям (5) и (6) определяется примерно с одинаковой точностью (~ 3.0 — 6.0%) в зависимости от угла φ . Однако, как это видно из кривых на фиг. 5, в условиях работы материала под воздействием циклических нагрузок обе зависимости дают существенную погрешность. Расхождение, как правило, выше, когда меньше угол между плоскостью циклического деформирования и главными осями анизотропии, и прогрессирует по мере увеличения длительности циклического нагружения (циклической долговечности). С точки зрения асимметрии циклического напряжения наибольшее расхождение наблюдается при пульсирующем растяжении (56.0% и 5.10% соответственно для углов

$\varphi = 15^\circ$ и $\varphi = 30^\circ$)². Менее всего расходятся результаты при пульсирующем сжатии (соответственно 36.2% и 4.7%). Расхождение между фактической усталостной прочностью и вычисленной по зависимости (б) составляет для углов $\varphi = 15^\circ$ и $\varphi = 30^\circ$ 23.2% и 1.9% (при $r = 0$) и 11.8% и 2.6%, когда $r = -\infty$.

Изложенное выше свидетельствует о том, что при длительном циклическом нагружении стеклопластика зависимостями типа (5) и (6), справедливыми для статической прочности, следует пользоваться с большой осторожностью. Причина наблюдающегося систематического расхождения, по-видимому, заключается в том, что выражения (5) и (6) не отражают изменения механических свойства (и частности, изменение свойства анизотропии прочности), которые имеют место в материале вследствие накопления повреждений и зависят от вида и длительности циклического нагружения.

Выводы. 1. Зависимость между усталостной прочностью и логарифмом выносливости может быть представлена двумя линейными участками для всех видов циклического деформирования и произвольной анизотропии стеклопластика.

2. Изменение знака среднего напряжения цикла от сжимающего на растягивающее приводит к уменьшению усталостной прочности стеклопластика. Этот эффект в большой мере проявляется при нагружении под углом к направлению армирования и прогрессирует с увеличением длительности циклического деформирования.

3. Под воздействием циклического нагружения в стеклопластике происходит усиление свойства анизотропии усталостной прочности, которое зависит от вида деформации и выносливости материала.

4. Известные зависимости предела статической прочности анизотропного тела существенно расходятся с экспериментом при использовании их для условия циклического нагружения.

Институт математики и механики

АН Армянской ССР

Поступила 29 IX 1970

Ե. Ե. ՄԱՊՅԱԿ

ՏՎԱՄ ՏԻՓԻ ԱՊԱՆԵՊԱՍՏՆԵՐԻ ՀՈՂԵԱՆՈՒԹՅԱՆ ԱՐԲՈՒԹՅԱՆ ԱՆԻՉՈՏՐՈՊԻԱՆ

Ա Վ Փ Ն Փ Ն Վ

Ստուժնաիրվում է ՏՎԱՄ1-ի և ՏՎԱՄ5-ի տիպի սպախիկոպաստների հոլիանոթյան ամրոթյան անդոտրոպիան թելիկների ուղղոթյամբ, ինչպես նաև այն ուղղոթյուններով, որոնք նրանց հետ կազմում են 15° , 30° և 45° , սիմետրիկ ձգման-սեղման և բարախող ձգման ու սեղմանն դեպքերում:

² Приводимые данные соответствуют результатам вычислений по формуле (5) на базе 10^6 циклов

