

УДК 678.620:178

К ВОПРОСУ ОПТИМИЗАЦИИ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ
ОРИЕНТИРОВАННЫХ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ

САРКИСЯН Н. Е.

Одним из принципиальных преимуществ современных композитных материалов является возможность усиления их механических свойств в направлении, в котором ожидается воздействие расчетной нагрузки. Такое усиление свойств материала (например, прочности), при сохранении неизменными других технологических факторов (тип связующего, волокна и т. д.), достигается доведением объемного содержания наполнителя до оптимальной величины и укладкой в нужном направлении большего числа волокон (усилением степени армирования).

Экспериментальному исследованию выбора оптимального содержания стекла и влияния степени ортогонального армирования на прочность и деформативность стеклопластиков посвящено множество работ [1]. Сравнительно мало изучен этот вопрос применительно к длительной прочности и ползучести [2] и, особенно, условиям циклического нагружения [3—6].

Между тем, актуальность подобных исследований очевидна в том аспекте, что параметры армирования, оптимальные для работы композита в условиях кратковременного нагружения, могут оказаться не совсем оптимальными при циклическом воздействии нагрузки, то есть, как отмечается в [7], оптимизация предела прочности стеклопластиков еще не означает оптимизацию их усталостной прочности.

Возможность такого положения впервые была установлена в экспериментальном исследовании [3], где рассматривалось влияние на усталостную прочность процентного содержания стекловолокон, укладываемых параллельно линии действия нагрузки. Некоторые результаты из этой работы приведены в табл. 1, где значения предела прочности испытанного материала на кратковременное статическое растяжение и сжатие нами взяты из обзора [7].

В соответствии с полученными в работе [3] данными стеклопластики, в которых все волокна уложены параллельно линии действия нагрузки, проявляют высокую прочность на растяжение и сжатие при однократном нагружении или при нескольких циклах до разрушения, но их усталостная прочность быстро падает с увеличением числа циклов до разрушения. Вместе с тем, добавка небольшого процента волокон в направлении, перпендикулярном к основному направлению арми-

рования, или добавление чередующихся слоев под небольшим углом к оси нагрузки, приводило к заметному повышению усталостной прочности стеклопластика.

Ниже исследуем влияние степени ортогонального армирования на усталостную прочность ориентированных стеклопластиков с учетом типа связующего и вида осевой деформации.

Испытывались ориентированные стеклопластики типа СВМ на эпокси-фенольном и бутвар-фенольном связующем, с укладкой волокон в двух ортогональных направлениях 1:1 и 5:1.

Методики проведения испытаний и статистической обработки экспериментальных данных освещены в работах [5, 6, 8].

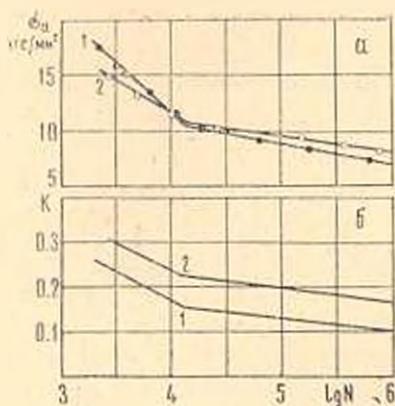
Как известно, исследование механических свойств желательно проводить на образцах, изготовленных из материала одной партии. При длительных испытаниях изменение «возраста» образцов в одной серии от 1 до 2 лет практически неизбежно. В наших опытах стеклопластики на эпокси-фенольном связующем в момент испытания были в «возрасте» 1—2 лет, а на СВМ 1:1 и СВМ 5:1 на связующем БФ-4 соответственно 5 и 10 лет. Исследование влияния старения на статическую прочность и деформативность стеклопластиков типа СВМ показало, что после двух лет хранения образцов в комнатных условиях «возраст» материала практически перестает влиять на предел прочности и модуль упругости стеклопластика [9]. Старение практически не меняет также и усталостную прочность стеклопластика СВМ [10]. В настоящей работе сериям усталостных испытаний непосредственно предшествовало определение статической прочности стеклопластиков. Поэтому анализ усталостных кривых в координатах $K - \lg N$ позволяет в неискаженном виде рассмотреть влияние степени ортогонального армирования на изменение усталостной прочности стеклопластиков.

На фиг. 1—3 приведены кривые Велера, иллюстрирующие влияние степени ортогонального армирования на абсолютное значение и коэффициент K усталостной прочности стеклопластиков типа СВМ.

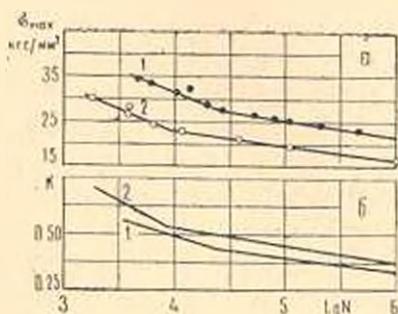
Для серии образцов на эпокси-фенольном связующем характерно снижение циклической прочности в направлении укладки большего числа волокон по сравнению с ортогонально равнопрочно армированным стеклопластиком. На это явление количественно влияет также и вид деформации. При симметричном растяжении-сжатии значения усталостной прочности СВМ 1:1 и СВМ 5:1 мало отличаются (фиг. 1), в то время как в случае пульсирующего растяжения прочность СВМ 5:1 продолжает оставаться выше, чем прочность стеклопластика типа СВМ 1:1 (фиг. 2).

Таким образом, в рассматриваемых здесь усталостных испытаниях стеклопластиков на эпокси-фенольном связующем наблюдается качественно та же картина, что и в [3]. Уместно отметить, что в указанной работе также испытывались стеклопластики на эпоксианном связующем.

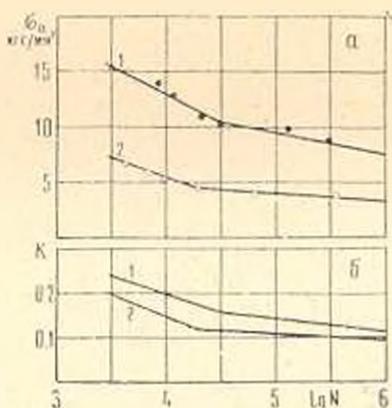
С точки зрения влияния типа связующего представляют интерес кривые Велера, приведенные на фиг. 3. Из этих кривых видно, что при том же симметричном цикле осевой деформации прочность СВМ



Фиг. 1. Усталостная диаграмма стеклопластика на эпокси-фенольном связующем при симметричном растяжении-сжатии. 1.—СВАМ 5 : 1, 2.—СВАМ 1 : 1.



Фиг. 2. Усталостная диаграмма стеклопластика на эпокси-фенольном связующем при пульсирующем растяжении. 1.—СВАМ 5 : 1, 2.—СВАМ 1 : 1.



Фиг. 3. Усталостная диаграмма стеклопластика на бутвар-фенольном связующем при симметричном растяжении-сжатии. 1.—СВАМ 5 : 1, 2.—СВАМ 1 : 1.

5:1 на бутвар-фенольном связующем неизменно выше, чем усталостная прочность композита на основе того же связующего, но при ортогонально равнопрочной укладке волокон. Это связано с различиями в адгезионной прочности между эпокси- и бутвар-фенольными связующими и стекловолокном и в механических характеристиках самих связующих. Адгезионная прочность смолы БФ-4 примерно в 1,5 раза ниже, чем эпокси-фенольного связующего как и абсолютном значении, так и по отношению к пределу прочности стеклопластика на растяжение. Этим предопределен существенно низкий предел прочности СВАМ 1:1 на смоле БФ-4. Прочность же СВАМ 5:1 в направлении «5» не усту-

пает прочности того же композита на эпокси-фенольном связующем потому, очевидно, что прочность композиции определяется не только прочностью адгезионной связи, но и свойствами (прочностью) армирующих волокон, которых в том же направлении в этом случае несколько раз больше.

В табл. 2 приведены значения усталостной прочности и коэффициента K стеклопластиков на базе 10^6 циклов нагружения. Эти данные свидетельствуют о том, что повышение степени ортогонального армирования композита в каком-либо направлении путем укладки в этом направлении большего числа волокон, являющееся одним из способов повышения кратковременной прочности, в отношении усталостной прочности может явиться не только неэффективным, но и в определенных случаях может стать причиной ее существенного снижения. Так, для стеклопластика на эпокси-фенольном связующем укладка волокон 5:1 по сравнению 1:1 увеличивает статическую кратковременную прочность на растяжение и сжатие почти в 1,5 раза в то время как, например, при $N=10^6$ циклов усталостная прочность в отнулевом растяжении увеличивается лишь на 25%, а на симметричное растяжение-сжатие даже уменьшается на 20%. Коэффициент усталостной прочности в обоих случаях уменьшается соответственно на 18 и 41%.

Иную картину представляет усталостное поведение стеклопластика на бутвар-фенольном связующем. Эта же укладка волокон приводит к повышению не только статической прочности, но и усталостной прочности композита на симметричный цикл растяжения-сжатия. Причем повышение усталостной прочности оказывается даже относительно больше, чем увеличение предела прочности (соответственно в 2,2 и 1,8 раза).

Таблица 1

Зависимость усталостной прочности от содержания стекла параллельно направлению нагрузки и угла ориентации волокон

Содержание стекла, вес. %	Содержание стекла параллельно направлению нагрузки, %	Угол ориентации волокон относительно нагрузки, град	Предел прочности при растяжении $\sigma_{\text{р}}$, кгс/мм ²	Предел прочности при сжатии $\sigma_{\text{с}}$, кгс/мм ²	Усталостная прочность на базе 10^6 циклов $\sigma_{\text{с}}$, кгс/мм ²	Коэффициент усталостной прочности K на базе 10^6 циклов	
						$\frac{\sigma_{\text{с}}}{\sigma_{\text{р}}}$	$\frac{\sigma_{\text{с}}}{\sigma_{\text{с}}}$
65.4	100	0	84.3	62.6	17.5	0.21	0.28
65.5	85	0.80	81.8	58.4	20.5	0.25	0.35
66.9	71	0.80	74.3	56.9	19.7	0.26	0.35
67.6	—	± 5	82.0	65.1	25.2	0.31	0.39
64.9	—	± 10	67.6	59.8	18.5	0.27	0.31
64.6	—	± 15	62.7	58.7	14.0	0.22	0.24
63.0	—	± 5	71.0	58.3	21.7	0.31	0.37
74.3	—	± 5	94.6	73.5	23.4	0.25	0.32

Можно указать на целый ряд известных факторов, могущих быть причиной снижения усталостной прочности ортогонально неравнопроч-

Таблица 2

Зависимость усталостной прочности стеклоластиков от степени ортогонального армирования, вида деформации и типа связующего

Тип связующего стеклоластика	Укладка волокон	Кратковременный предел прочности, кгс/мм ²		Коеф. асимметрии цикла напряжений γ	Усталостная прочность на базе 10^6 циклов, кгс/мм ²	Коеффициент усталостной прочности K на базе 10^6 циклов		Температура разогрева при разрушении, °С
		$\sigma_{вр}$	$\sigma_{сж}$			$\frac{\sigma_{сж}}{\sigma_{вр}}$	$\frac{\sigma_{сж}}{\sigma_{сж}}$	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Эпокси-фенольное	1:1	48,00±0,55	36,05±0,80	-1	8,15±0,50	0,17±0,01	0,23±0,01	79,0±2,0
	5:1	67,55±0,60	49,50±2,50	-1	6,95±0,85	0,10±0,01	0,14±0,02	10,0±1,0
	1:1	43,10±3,25	—	0	16,85±1,40	0,39±0,03	—	120,0±2,5
	5:1	64,10±4,05	—	0	21,30±1,45	0,33±0,02	—	125,0±3,0
Бутвар-фенольное	1:1	35,80±1,00	28,90±0,50	-1	3,25±0,30	0,09±0,01	0,11±0,01	67,5±1,5
	5:1	65,75±1,80	—	-1	7,55±0,60	0,11±0,01	—	57,5±3,0

Примечание. Для значений прочности стеклоластика на кратковременное растяжение и сжатие ($\sigma_{вр}$ и $\sigma_{сж}$) указано среднее квадратическое отклонение, а для усталостной прочности—отклонение от среднего значения, соответствующее доверительному интервалу при вероятности 95%, рассчитанное по распределению Стьюдента.

В столбцах 6 и 7 при пульсирующем растяжении дано максимальное напряжение цикла и значение отношения $\sigma_{сж}/\sigma_{вр}$.

ных стеклопластиков. Это, в частности, плотная укладка волокон в одном направлении, приводящая к возникновению концентрации деформаций и напряжений. Уменьшение объемного содержания связующего в направлении действия нагрузки может приводить и к снижению межслойной сдвиговой прочности композита в этом направлении.

Рассмотрим возможность влияния циклического разогрева на изменение прочности ортогонально неравномерно армированного стеклопластика, имея в виду, в частности, убывание адгезионной прочности полимерного связующего к стекловолокну по мере возрастания температуры [11].

В основных испытаниях настоящей работы температура циклического разогрева измерялась на поверхности образцов. С целью установления связи между температурой разогрева внутри и на поверхности образца были поставлены специальные опыты. При этом придерживались методики, предложенной в [12]. Термометры помещались в два симметрично расположенных относительно продольной оси образца отверстия диаметром ~ 1 мм. Длина отверстия составляла примерно половину ширины рабочей части или толщины образца. Как показали опыты, отверстия указанных размеров снижали прочность на статическое растяжение не более, чем на 2,7%. При пульсирующем растяжении и симметричном растяжении-сжатии такие отверстия не влияли и на усталостную прочность стеклопластиков.

Отношение значений температуры разогрева T внутри и на поверхности образцов, на линейном участке зависимости $T-N$, в течение времени до $0,8-0,9 \cdot N_0$ (N_0 —число циклов до разрушения) является постоянным и при толщине образца, например, 10 мм составляет $\sim 1,20$. На стадии перед разрушением образца это отношение возрастает до 1,35.

В табл. 2 приведены среднеарифметические значения температуры разогрева внутри композита перед разрушением образца. При симметричном растяжении-сжатии СВМ 1:1 и 5:1 на смоле БФ-4 температуры разогрева довольно близки, а для стеклопластика на эпоксифенольном связующем при укладке волокон 5:1 температура даже в 2 раза ниже. Эти данные указывают на то, что циклический разогрев не может быть причиной наблюдаемого факта более низкой усталостной прочности композита в направлении укладки большего числа волокон.

Такое заключение можно обосновать и тем, что температурное падение прочности стеклопластиков СВМ 1:1 и СВМ 5:1 при статическом растяжении и сжатии не зависит от укладки волокон [13]. Кроме того, отношение модулей упругости при заданной высокой и нормальной температуре меняется с изменением температуры для ортогонально равнопрочного стеклопластика даже в большей мере, чем для однонаправленного стеклопластика [14].

Вывод. Установлено, что усиление степени ортогонального армирования стеклопластика в каком-либо направлении путем укладки в этом направлении большего числа волокон, являющееся одним из

способов повышения статического предела прочности, в отношении усталостной прочности может быть неэффективным и даже привести к ее существенному снижению.

ԿՈՂՄԵՈՐՈՇՎԱԾ ԱՊԱԿԵՊՈՒԱՍՏԻԿՆԵՐԻ ՀՈԳՆԱԾԱՅԻՆ ԱՄՐՈՒԹՅԱՆ
ՅՊՏԻՄԻՉԱՑԻԱՅԻ ՀԱՐՑԻ ՇՈՒՐՋԸ

Ն. Ե. ՍԱՐԳՍՅԱՆ

Ա մ փ ո փ ո ս ը

Սահմանված է, որ կախված մի շարք գործոններից (լարումների սիկլի ասիմետրիա, խեմի սարատեսակ և այլն) ապակեպլաստիկների օրթոգոնալ սմբանախորման ուժեղացումը մի ուղղությամբ ոչ միայն կարող է չի՛նել նյութի հողնածային ամրության բարձրացման արդյունավետ եղանակ, այլև զուտ հրա զգալի թուլացման պատճառ:

THE PROBLEM OF OPTIMIZATION OF THE DIRECTED
FIBER-GLASS REINFORCED PLASTICS FATIGUE STRENGTH

N. E. SARKISIAN

S u m m a r y

Depending on certain factors (asymmetry of stress cycle, type of synthetic resins, etc.) it has been established that the intensification of fiber-glass reinforcements in any direction may not be an effective means of material fatigue strength increase. It has been shown that it maybe the reason of essential decrease of material fatigue strength.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Андреевская Г. Д. Высокопрочные ориентированные стеклопластики. М.: Наука, 1966. 370 с.
2. Скудра А. М., Булавс Ф. Я., Роценс К. А. Ползучесть и статическая усталость армированных пластиков. Рига: Зинатне, 1971. 240 с.
3. Bolter K. H. Resume of Fatigue Characteristics of Reinforced Plastic Laminates Subjected to Axial Loading.—In: Fatigue an interdisciplinary approach Proceedings of the 10 th Sagamore Army Materials Research Conference. 1964, p. 325—341.
4. Smith T. R., Owen M. J. Fatigue properties of RP.—Modern Plastic, 1969, v. 46, № 4, p. 124—126, 128, 132.
5. Саркисян Н. Е. Прочность и деформативность стеклопластиков типа СВAM при циклическом осевом нагружении.—Изв. АН АрмССР, Механика, 1969, т. 22, № 6, с. 54—63.
6. Саркисян Н. Е. Анизотропия усталостной прочности стеклопластиков типа СВAM.—Изв. АН Арм. ССР, Механика, 1971, т. 24, № 2, с. 59—70.

7. Браугман Л. Армированные волокнами пластики.—В кн.: Современные композиционные материалы. М.: Мир, 1976, с. 414—505.
8. Саркисян Н. Е. Усталостные свойства ортогонально армированного неравнопрочного стеклопластика.—Изв. АН АрмССР, Механика, 1976, т. 29, № 1, с. 67—74.
9. Мартиросян М. М. Влияние старения на ползучесть стеклопластика СВАН при растяжении с учетом ориентации волокон.—Механика полимеров, 1965, № 6, с. 20—29.
10. Саркисян Н. Е. О влиянии термической обработки на усталостные свойства петканого стеклопластика.—Изв. АН Арм. ССР, Механика, 1972, т. 25, № 5, с. 71—76.
11. Лаурентьев В. В., Горбаткина Ю. А., Хирхардин С. Н., Абрамова Г. А. Изучение адгезии полимеров к стеклянным волокнам в широком интервале температур.—В кн.: Физико-химия и механика ориентированных стеклопластиков. М.: Наука, 1967, с. 59—64.
12. Олдырев П. П. Температура разогрева и разрушение пластмасс при циклическом деформировании.—Механика полимеров, 1967, № 3, с. 483—492.
13. Кнастикова Е. П., Зверев А. Н. Исследование механических характеристик стеклопластиков типа СВАН в условиях пониженных и повышенных температур.—В кн.: Физико-химия и механика ориентированных стеклопластиков. М.: Наука, 1967, с. 211—215.
14. Гуменюк В. С., Крицук А. А., Лосицкий В. Н. Исследование влияния температуры на механические свойства силовых стеклопластиков.—В кн.: Термопрочность материалов и конструктивных элементов, Киев: Наукова думка, вып. 4, 1967, с. 155—159.

Ереванский политехнический институт
им. К. Маркса

Поступила в редакцию
7.11. 1984