

Н. Е. САРКИСЯН

УСТАЛОСТНЫЕ СВОЙСТВА ОРТОГОНАЛЬНО АРМИРОВАННОГО НЕРАВНОПРОЧНОГО СТЕКЛОПЛАСТИКА

Исследование механических свойств ортогонально армированных неравнопрочных композиционных материалов в условиях длительного нагружения представляет определенный интерес [1]. Между тем имеется крайне мало данных о механическом поведении этих материалов при циклическом воздействии нагрузки [2].

Целью настоящей работы явилось экспериментальное изучение усталостных свойств ортогонально ориентированного стеклопластика типа СВАН 5:1 на бутвар-фенольном (БФ-4) связующем при многоцикловом симметричном осевом растяжении—сжатии. Рассмотрено влияние анизотропии материала, для чего нагрузка прикладывалась вдоль волокон ($\varphi = 0^\circ$ и 90°)^{*} и в диагональном направлении ($\varphi = 45^\circ$).

Методика экспериментального исследования и статистической обработки опытных результатов описана в работе [2]. Усталостные испытания проводились в режиме нагружения $P = \text{const}$ при частоте 1200 циклов/мин. На каждом уровне циклического напряжения было испытано 3 образца. Для определения статической кратковременной прочности композита испытывалось по 5 образцов. Испытания проводились в нормальных условиях среды при температуре, колебавшейся в пределах 19—23°C.

§ 1. На фиг. 1 показаны усталостные диаграммы Велера. Параметры линейного корреляционного уравнения $\sigma_d = \lg N$ по участкам диаграмм приведены в табл. 1. Там же помещены значения пределов прочности стеклопластика σ_b при растяжении, которые соответствуют постоянной скорости перемещения захватов разрывной машины, равной 6 мм/мин. Замечен существенный разброс данных по σ_b , относящихся к образцам, вырезанным в диагональном направлении.

Сравнение полученных здесь результатов с данными экспериментов над стеклопластиком типа СВАН 5:1 на эпокси-фенольном связующем [2] дает некоторое представление о влиянии типа связующего на усталостные свойства композита^{**}.

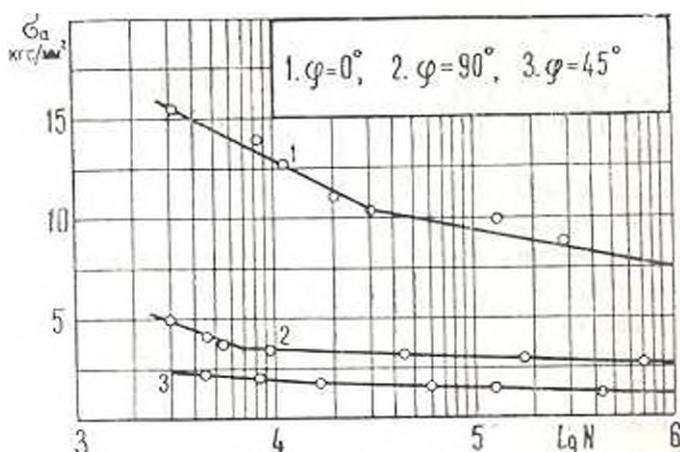
В данном случае тип связующего (эпокси-фенольное с применением фенольных смол резольного типа и бутвар-фенольное) мало влияет как на статическую кратковременную прочность стеклопластика при растяжении, так и на усталостную прочность при симметричном растяжении—сжатии.

При нагружении композита в направлении $\varphi = 0^\circ$, когда нагрузку воспринимают волокна, величина σ_b и усталостной прочности для обоих

* Отсчет угла φ здесь ведется от направления укладки большего числа волокон.

** Влияние типа связующего, в частности, на циклическую прочность стеклопластиков изучено во многих работах [3], [4] и др.

стеклопластиков практически одинакова, а в диагональном направлении прочность СВМ 5:1 на БФ-4 на 15% ниже.



Фиг. 1

Между тем, в обсуждаемых здесь опытах кратковременная прочность пластика на смоле БФ-4 в направлении $\varphi = 90^\circ$ оказалась даже выше ($\sim 10\%$), чем стеклопластика на эпокси-фенольном связующем, в то время как усталостная прочность для обоих стеклопластиков почти одинакова.

Таблица 1

Угол надреза образца φ , град.	Предел прочности σ_b , кгс/мм ²	Коэфф. вариации σ_b , %	Уст. прощ. точки перехода диаграммы кгс/мм ²	Номер участка диагр.	Параметры корреляции $\sigma_b - A - B \lg N$			Коэф. уст. проч. на базе 10^6 цикл.	Критическая температура разогрева T_k , °C	Температура разогрева при разрушении T_p , °C
					A	B	коэфф. корреляции			
0	55.75	2.74	10.80	1	33.0680	5.0403	-0.9647	0.11	32.0 ± 0.5	42.5 ± 2.5
				2	19.8936	2.0585	0.8390			
45	12.15	11.92	1.80	1	5.7628	0.9480	-0.9206	0.10	32.0 ± 1.0	46.0 ± 1.5
				2	3.1496	0.3242	-0.8333			
90	25.05	2.32	3.65	1	16.7337	3.4345	-0.8873	0.11	56.0 ± 1.5	77.5 ± 3.0
				2	5.3729	0.4481	-0.9698			

Если иметь в виду заметно низкую адгезионную прочность бутпар-фенольного связующего к стекловолокну [3], то указанное несоответствие может быть лишь следствием неточности в порядке укладки стеклошпона в листе (неточного набора пакета) в ортогональных направлениях. Как известно [5], это заметно искажает (в нашем случае повышает) предел прочности ортогонально неравнопрочного стеклопластика в направлении меньшего числа волокон, хотя его влияние может не проявляться в основном направлении армирования, где укладываемое число волокон в 5 раз больше.

Следует отметить, что циклическая прочность образцов в точке перегиба усталостной диаграммы $\sigma_{1/2} = \lg N$, которая характеризует особенности процесса многоциклового усталости материалов [6], меняется пропорционально σ_{ψ} в зависимости от типа связующего при $\psi = 0^\circ$ и 45° , в то время как в направлении $\psi = 90^\circ$ имеет место уже обратная пропорциональная зависимость.

Указанное здесь несоответствие между величиной $\sigma_{1/2} = 25.05 \text{ кгс/мм}^2$ (22.20) и усталостной прочностью образцов в точке перегиба $\sigma_{1/2} = \lg N$, равной 3.65 кгс/мм^2 (4.20)¹, вместе с тем свидетельствует об отсутствии жесткой корреляции между $\sigma_{1/2}$ и усталостной прочностью материала.

В этой связи рассмотрим влияние типа связующего на изменение параметра B в корреляционном уравнении $\sigma_{1/2} = \lg N$. Очевидно, чем больше значение параметра B , тем материал более чувствителен к циклическому нагружению.

С другой стороны, чувствительность стеклопластиков к циклическому нагружению определяется другим параметром — коэффициентом усталостной прочности K . Чем меньше значение K , тем материал более чувствителен к циклическому нагружению.

Для полной оценки сопротивляемости материала усталостному разрушению, на наш взгляд, следует не ограничиваться только коэффициентом K , а желательно рассматривать также и параметр B . Для идеального материала имели бы $K = 1.00$ и $B = 0$, для реальных материалов — $K < 1$ и $B > 0$.

Что касается коэффициента усталостной прочности K , вычисляемого в данной работе по отношению к пределу прочности на растяжение $\sigma_{1/2}$, то на базе 10^6 циклов он оказывается равным ~ 0.10 и не зависящим как от угла нагружения ψ , так и от типа связующего (см. табл. 1 и работу [2]).

Как показывает анализ полученных данных, в области малой долговечности падение усталостной прочности для СВМ 5:1 на эпоксифенольном связующем независимо от угла ψ в 1.5—1.7 раза больше, чем для пластика на связующем БФ-4. На участке большой долговечности, который с инженерной точки зрения представляет нам больший интерес, это отношение составляет 1.3 и 2.2 ($\psi = 45^\circ$ и 90°) и, наоборот, 0.63 для образцов, вырезанных в направлении $\psi = 0^\circ$.

Рассмотрим также изменение отношения $B/\sigma_{1/2}$. Как показывают расчеты, по этому отношению тоже, независимо от угла ψ , более чувствительным к циклическому нагружению является стеклопластик на эпоксифенольном связующем.

Таким образом, можно заключить, что стеклопластик СВМ 5:1 на эпоксифенольном связующем в целом более чувствителен к циклическому растяжению—сжатию, чем СВМ 5:1 на смоле БФ-4. По нашим данным, только при $\psi = 0^\circ$ и большой долговечности чувствительность стеклопластика на БФ-4 больше, чем пластика на эпоксифенольном связующем.

¹ Цифры в скобках соответствуют СВМ 5:1, $\psi = 90^\circ$, на эпоксифенольном связующем [2].

§ 2. Стеклопластики проявляют высокую чувствительность к направлению внешней нагрузки, что проявляется в анизотропии прочности материала.

Установлено, что анизотропия прочности ориентированного стеклопластика при циклическом нагружении выражена сильнее, чем при статическом воздействии нагрузки [2, 7].

Численной характеристикой чувствительности стеклопластика к направлению действия нагрузки может служить коэффициент степени анизотропии прочности ψ , определяемый отношением величины прочности при данном угле нагружения (τ°) к соответствующей прочности при $\varphi = 0^\circ$ [7]

$$\psi = \frac{\sigma^\circ}{\sigma^\tau}$$

где σ° и σ^τ — статическая, либо усталостная прочность композита при одинаковой долговечности N и идентичности прочих экспериментальных условий нагружения.

В работах [2, 7] было обнаружено определенное изменение степени анизотропии усталостной прочности стеклопластиков в зависимости от долговечности, при этом рассматривалось влияние угла нагружения φ , асимметрии цикла напряжений, типа связующего и соотношения волокон в ортогональных направлениях. Примечательным оказалось то, что по мере увеличения долговечности анизотропия усталостной прочности СВАМ на эпокси-фенольном связующем во всех случаях усиливалась (коэффициент ψ уменьшался) [2], в то время как для СВАМ 1:1 на бутвар-фенольном связующем, наоборот, анизотропия уменьшалась [7].

Анализ полученных экспериментальных результатов показывает (табл. 2), что и для ортогонально неравнопрочного СВАМ 5:1 на связующем БФ-4 анизотропия усталостной прочности выражена сильнее, чем анизотропия предела прочности σ_b , и, кроме того, она снова проявляет тенденцию к ослаблению по мере увеличения долговечности. В этом заключена одна из принципиальных особенностей влияния типа рассмотренных связующих на усталостные свойства стеклопластика.

§ 3. Циклический разогрев ортогонально неравнопрочного стеклопластика проявляется при испытаниях на многоцикловую усталость.

На фиг. 2 приведены характерные кривые кинетики разогрева $\Delta T - N$ в зависимости от амплитудной величины напряжения и угла φ ориентации нагрузки.

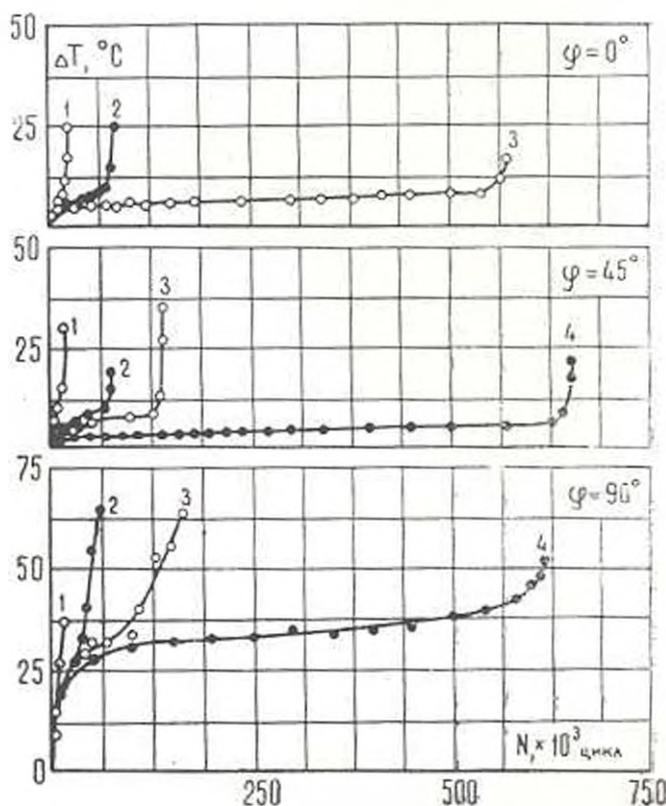
Температура разогрева измерялась на поверхности образца в зоне излома с помощью медноконстантановых термомпар. На некоторых кривых виден существенный разброс измеренных температур разогрева при разрушении по сравнению со средне-статистической величиной T_0 . Это является следствием малой теплопроводности стеклопластика, проявляющейся в значительной локализации нагрева по длине образца [8].

* Расположение термомпар на поверхности образца в данных опытах могло отклоняться от фактического места излома в пределах до 2—3 мм. При достаточно больших значениях долговечности, в случае совпадения места крепления термомпары с сечением

В табл. 1 помещены среднеарифметические значения критической температуры разогрева T_k и температуры разрушения T_p , полученные при различных напряжениях и вычисленные с учетом температуры окружающей среды. Показан разброс среднего значения, равный s/\bar{V} и что, соответ-

Таблица 2

Угол вырезки образца φ , град	$\bar{\Delta}$ при статич. нагружении	$\bar{\Delta}$ при долговечности N циклов					
		$5 \cdot 10^3$	10^4	$5 \cdot 10^4$	10^5	$5 \cdot 10^5$	10^6
0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
45	0.185	0.156	0.152	0.162	0.161	0.160	0.159
90	0.381	0.288	0.280	0.319	0.328	0.344	0.358



Фиг. 2. Кинетика циклического разогрева СВМ 5:1 на связующем БФ-4.

$\varphi = 0^\circ$, 1. — 10.95, 2. — 9.94, 3. — 8.79 кгс/мм²

$\varphi = 45^\circ$, 1. — 1.76, 2. — 1.66, 3. — 1.50, 4. — 1.38 кгс/мм²

$\varphi = 90^\circ$, 1. — 3.50, 2. — 3.23, 3. — 2.98, 4. — 2.85 кгс/мм²

излома, искажение и измеряемом значении T_p может быть обусловлено недостаточностью времени для передачи тепла гистерезисного нагрева из глубины на поверхность образца.

ствуует значимости ~ 0.67 по распределению Стьюдента (s — среднеквадратическое отклонение температуры разогрева, n — число опытов). Величина температуры T_p определялась по методике, предложенной в [9].

Как показывают полученные результаты, при заданной частоте нагружения и напряжениях, соответствующих долговечности 10^4 — 10^5 циклов, соблюдается условие независимости критических значений температур T_p и T_r от напряжения. Эти условия впервые были получены в [10] для температуры T_p и в [8] для температуры разрушения T_r , затем подтверждены в ряде работ других авторов, в том числе [2, 11 и др.].

Вместе с тем, следует отметить, что возможно не всегда соблюдается условие постоянства температуры разогрева в момент разрушения, например, при более широком диапазоне амплитуд напряжений [12—14].

Заметное влияние типа связующего на разогрев проявляется в случаях деформирования стеклопластика в направлениях армирования, особенно в направлении укладки меньшего числа волокон (табл. 1). Сравнение полученных здесь значений с соответствующими характеристиками разогрева стеклопластика, испытанного в работе [11], указывает на значительно более сильный разогрев СВМ 5:1 на бутвар-фенольном связующем (более 1.5 раза при $\varphi = 90^\circ$ и 1.2—1.4 раза, когда $\varphi = 0^\circ$). В этом случае температура разогрева при разрушении практически достигает температуры теплостойкости материала [15]*.

При деформировании образцов, вырезанных в диагональном направлении, характерные значения температуры разогрева стеклопластика на смоле БФ-4 оказываются, наоборот, несколько ниже, чем пластика на эпокси-фенольном связующем. Несмотря на это, разрушение образцов на СВМ 5:1 на БФ-4 при этом носит выраженный тепловой характер, проявляющийся и в том, что образец при температуре T_r , вследствие теплового размягчения смолы, практически теряет свою жесткость. В пользу преимущественно теплового характера разрушения СВМ на указанной смоле может свидетельствовать и то обстоятельство, что если прервать опыт при температуре разогрева между T_p и T_r и дать образцу некоторое время для остывания, то он почти полностью восстанавливает свою первоначальную жесткость.

Выводы. 1. Тип связующего (эпокси- и бутвар-фенольное) мало влияет на статическую кратковременную прочность стеклопластика СВМ 5:1 при растяжении, так и на его усталостную прочность при симметричном осевом растяжении—сжатии.

2. Установлено, что анизотропия усталостной прочности ориентированных стеклопластиков типа СВМ выражена сильнее, чем анизотропия предела прочности. При этом в зависимости от долговечности анизотропия усталостной прочности может усиливаться (эпокси-фенольное связующее) и ослабевать (бутвар-фенольное связующее).

3. Температура разогрева при разрушении СВМ 5:1 на связующем БФ-4 практически достигает температуры теплостойкости материала по

* Теплостойкость стеклопластика на связующем БФ-4, например, по Маргелю почти в 3 раза ниже, чем теплостойкость стеклопластика на эпокси-фенольном связующем (65° и 200°C) [15].

Մարտենսու. В частном случае, когда нагрузка действует в направлении $\varphi = 45^\circ$, вследствие размягчения смолы разрушение образцов носит выраженный тепловой характер.

Институт механики АН
Армянской ССР

Поступила 14 VII 1975

Կ. Է. ՍԱՐԿԻՍԻԱՆ

ՈՐՈՒՄՆԱԿԱՆ ԲՈՒՄՈՒՄԻՆԻ ԱՐՄԱՆԱՎՈՐՎԱԾ ԱՊԱԿԵՊԼԱՍՏԻ
ՀՈՒՆԱՆՈՒՄԻՆԻ ՀԱՏՎՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ

Ա Վ Փ Ն Փ Ն Փ Ն Փ

Կատարված է ՇՅԱՄ 5:1 տիպի ապակեպլաստի ցիկլիկ ամրության և ինքնատրամացման փորձնական նետադատություն 1200 ց/րոպ. հաճախականությամբ բազմաշրիկային սիմետրիկ ձգման-սեղման ղեկբում: Էներ կիրառվել է թեղիկներին զուգահեռ ($\varphi = 0^\circ$ և 90°) և անկյունաղծային ուղղությամբ:

Ստացված է, որ փորձարկված ապակեպլաստի նոգնածային ամրության անիզոտրոպիան արտահայտվում է ավելի ուժեղ, քան ամրության սահմանի անիզոտրոպիան և կախված հարատևությունից այն կարող է ուժեղանալ կամ թուլանալ (նայած խեժի տիպին):

Ինքնատրամացման ջերմաստիճանը բուտիլար-ֆենոլային խեժի վրա պատրաստված ապակեպլաստի քայքայման ղեկբում զորձնականորեն նույնում է այդ նյութի ջերմակայունության ջերմաստիճանին (բառ Մարտենսի): Մասնավոր ղեկբում, երբ $\varphi = 45^\circ$, խեժի փափկեցման հետևանքով նմուշների քայքայումը կրում է արտահայտված ջերմային բնույթ:

FATIGUE CHARACTERISTICS OF UNUNIFORMLY
ORTHOGONALLY REINFORCED GLASSFIBRE PLASTIC

N. E. SARKISIAN

S u m m a r y

The experimental results of investigation on cyclic strength and heating of glassfibre reinforced plastic, CBAM 5:1 type, under multicyclic symmetrical tension—compression at a frequency of 1200 $c/min.$, are presented. The load is applied along the fibre ($\varphi = 0^\circ$ and 90°) as well as in diagonal direction ($\varphi = 45^\circ$).

ЛИТЕРАТУРА

1. Скудра А. М., Булавс Ф. Я., Роженс К. А. Ползучесть и статическая усталость армированных пластиков. Рига, Зинатис, 1971.

2. Саркисян Н. Е. Анизотропия усталостной прочности стеклопластиков типа СВАН. Изв. АН Арм. ССР, Механика, 1971, т. XXIV, № 2.
3. Андреевская Г. Д. Высокопрочные ориентированные стеклопластики. М., Наука, 1966.
4. Owen M. J. Dynamic Fatigue of Reinforced plastics. „Fatigue and creep in reinforced plastics“. London, 1967.
5. Мартиросян М. М. Влияние неточности сборки пакета на прочность пластин СВАН. Межузловский сб. научных трудов. Серия 19 (химическая технология), вып. 2, 1975.
6. Flinney J. M. A review of the discontinuity or hump phenomenon in fatigue S/N curves: theories and further results. „J. Austral. Inst. Metals“, 1968, 13, No. 1.
7. Саркисян Н. Е. Прочность и деформативность стеклопластика типа СВАН при циклическом осевом нагружении. Изв. АН Арм. ССР, Механика, 1969, т. XXII, № 6.
8. Олдыреп П. П. Температура разогрева и разрушение пластмасс при циклическом деформировании. Механика полимеров, 1967, № 3.
9. Олдыреп П. П. Определение усталостной долговечности пластмасс при циклическом деформировании. Механика полимеров, 1967, № 1.
10. Стинские А. В. Изучение усталостных свойств жестких пластмасс. Автореф. канд. дисс. М., 1963.
11. Саркисян Н. Е. Влияние анизотропии на циклическую деформативность и разогрев стеклопластиков типа СВАН. Механика полимеров, 1971, № 5.
12. Запцев Г. П., Стрелица В. С. Сопротивление стеклопластиков разрушению при малоцикловом нагружении. В кн.: Прочность при малом числе циклов нагружения. М., Изд. Машиностр., 1969.
13. Нелев Я., Серхиенко С. В., Стрелица В. С. Прочность пластмасс. М., Изд. Машиностр., 1971.
14. Сидоренков А. Н., Золотов В. П. Саморазогрев стеклопластиков при циклическом нагружении. В сб.: Свойства судостроительных стеклопластиков и методы их контроля. Л., Изд. Судостр., 1974, вып. № 3.
15. Физические и механические свойства стеклопластиков. Справ. пособ. под ред. Ю. М. Молчанова. Рига, Изд. Зинатне, 1969.