

Н. Е. САРКИСЯН

К ВОПРОСУ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ

Для инженерной оценки сопротивляемости конструкционных материалов малоцикловому деформированию важно нахождение таких зависимостей, с помощью которых возможно определение долговечности по опытным данным механических свойств материала при кратковременном статическом нагружении.

С этой точки зрения весьма удобной оказалась зависимость Коффина [1]

$$\varepsilon_{\text{пл}} N^{\alpha} = C \quad (1)$$

устанавливающая связь между пластической деформацией разрушения и соответствующим числом циклов при малоцикловоом нагружении металлов в диапазоне $N = 1 \div 10^6$ циклов в условиях повышенных температур.

В выражении (1) постоянные α и C определяются свойствами материала и условиями испытания. Для большинства металлов показатель степени $\alpha = 0.5$. Постоянная C равна половине пластической деформации при статическом однократном нагружении, если предположить, что разрушение наступает в течение $1/4$ цикла.

Формула (1) применима для условий жесткого режима нагружения, так как одной из двух варьируемых в ней переменных величин является размах пластической деформации цикла ($\varepsilon_{\text{пл}}$).

В некоторых случаях [2 и др.] при расчетах по формуле (1) берется общая деформация цикла, поскольку при высоких значениях долговечностей упругая деформация становится существенной по сравнению с пластической или даже может превзойти ее.

В работе [3] уравнение кривой усталости (1) преобразовано к виду, удобному для использования в мягком режиме нагружения.

$$\sigma_y = \frac{E\sigma^*}{2N^{0.5}} + \sigma^* \quad (2)$$

где σ_y — напряжение, соответствующее заданному числу циклов до разрушения N , σ^* — напряжение предела выносливости.

Исходными значениями механических параметров материала в зависимости (2) являются модуль упругости E и постоянная σ^* , характеризующая относительное сужение образца перед разрушением при кратковременном растяжении.

Другой вариант описания кривой усталости принадлежит Мэнсону [4]. Зависимость, предложенная для условий жесткого режима нагружения, имеет вид

$$\varepsilon_a = 0.5 D^{0.6} N^{-0.6} + \frac{1.75 \sigma_a}{E} N^{-0.12} \quad (3)$$

где σ_a — предел прочности.

Параметр D определяется по относительному сужению поперечного сечения ψ при статическом растяжении образца,

$$D = \ln \frac{100}{100 - \psi}$$

и по своему значению равен $2c$.

Некоторые другие гипотетические формы записи аппроксимации между числом циклов N и величиной σ_a или ε подробно обсуждены Мэнсоном в рецензии к работе [3].

Отмеченные выше уравнения кривой малоциклового усталости инвариантны по отношению к виду циклической деформации, частоте нагружения и не учитывают изменения, происходящие в материале в процессе длительного нахождения его под нагрузкой (накопление повреждений и т. д.).

Заметим, что зависимость типа (1) требует также соблюдения подобия кривых усталости для различных материалов и условий испытания.

Оценка сопротивляемости стеклопластиков малоцикловому деформированию по формулам (1) и (3) в настоящее время в принципе невозможна, так как известные литературные данные экспериментов [5—10], за исключением [10], соответствуют мягкому режиму нагружения.

Проверка справедливости выражения (2) для стеклопластиков также оказывается трудной задачей ввиду отсутствия в литературе данных по относительному сужению поперечного сечения и напряжению предела выносливости.

Как известно, при действии нагрузки в направлении волокон стеклопластики разрушаются практически хрупко. Поперечное сужение образца перед изломом по сравнению с металлами значительно меньше. Кроме того, вследствие особенностей макроразрушения волокнистого материала определить сужение образца можно лишь весьма условно.

Что касается предела выносливости σ^* , то у стеклопластиков, как и у цветных металлов, такой предел отсутствует. Величина σ^* , соответствующая условно принимаемому пределу выносливости, в отличие от металлов существенно зависит от соблюдения идентичности технологии изготовления материала, а также от условий испытания. Это, в свою очередь, сильно уменьшит достоверность значения σ^* , принимаемого в основу расчета по формуле (2). Заметим также, что в настоящему времени в литературе отсутствуют систематические данные по условно принимаемому пределу малоциклового выносливости стеклопластиков.

Таким образом, необходимость простого, но достаточно эффективного способа оценки усталостной прочности стеклопластиков при малом числе

циклов нагружения с инженерно-конструкторской точки зрения является актуальной.

Искомая зависимость может быть эмпирической и содержать характеристики механических свойств, определяемые путем кратковременного испытания материала на простой вид деформации. Такими характеристиками могут быть предел прочности σ_b , модуль упругости E , другие механические показатели и какие-либо их эмпирические или физические комбинации. При этом, очевидно, следует иметь в виду как эффективность предлагаемой зависимости, так и возможность ее использования на основе минимума информации о свойствах композита.

Как известно, циклическая прочность стекловолоконистых материалов в основном коррелирует со значением предела прочности при кратковременном статическом нагружении.

В настоящей работе в качестве зависимости, оценивающей усталостную прочность стеклопластика при малоцикловом нагружении, предлагается эмпирическое выражение типа

$$\sigma_y = \sigma_b \cdot N^{-\beta} \quad (4)$$

со значением показателя степени $\beta = 0.05$.

Принимая для простоты, что разрушение в случае однократного статического растяжения происходит при $N = 1$, по формуле (4) получаем значение соответствующего циклического напряжения, равное пределу прочности. По нашим экспериментальным результатам, обсуждаемым ниже, такое условие практически соблюдается.

Очевидно, зависимость (4) самая простая и удобная в применении. Как и формула Коффина (1), она подразумевает подобие кривых усталости Велера в малоцикловой области при варьировании материалами и видами деформации в условиях нормальной температуры, когда нагрузка прикладывается вдоль волокон стеклопластика.

Для оценки усталостной прочности стеклопластика по формуле (4) и сравнения ее с экспериментальными результатами, нами испытывался ортогонально равнопрочно армированный стеклопластик СВМ на эпокси-фенольном связующем.

Образцы толщиной 5 мм в виде двухсторонней лопатки вырезались из листов композита в направлении волокон и предварительно подвергались термической обработке, как это было в [11].

Опыты проводились при комнатной температуре.

Предел прочности стеклопластика при кратковременном растяжении определялся по результатам испытаний 5 образцов: $\sigma_b = 49.85 \pm \pm 1.70 \text{ кгс/мм}^2$.

Циклическое нагружение соответствовало мягкому режиму и осуществлялось на разрывной машине статического деформирования ЦДМ-10, дополнительно оборудованной автоматическими переключателями.

Испытания проводились на пульсирующее растяжение. Коэффициент асимметрии цикла $r \approx 0.03$. Частота нагружения — 3 цикл/мин.

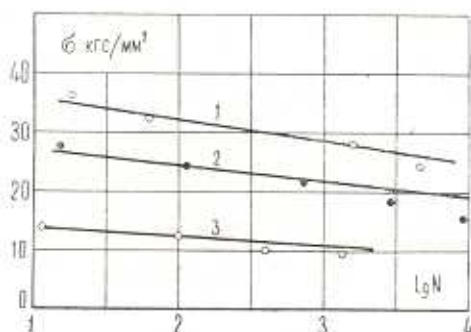
На фиг. 1 приведены кривая усталости, рассчитанная по формуле (4) и экспериментальные точки, характеризующие фактическую прочность данного стеклопластика в описанных условиях малоциклового нагружения. Как видно, соответствие между расчетными и экспериментальными данными вполне удовлетворительное, наибольшее отклонение по усталостной прочности менее 5%.



Фиг. 1. СВАН 1:1 на эпокси-фенольном связующем, растяжение вдоль волокон, $\sigma_{вр} = 49.85$ кгс/мм², частота 3 цикл/мин. — расчет, ○ — эксперимент.

Рассмотрим возможность прогнозирования кривых Велера различных стеклопластиков при пульсирующем растяжении, сжатии и симметричном чистом изгибе, исходя из литературных значений предела прочности материалов на тот же вид деформации [5—9]. Опытные данные усталостной прочности соответствуют мягкому режиму циклического нагружения частотой от 1 до 10 цикл/мин.

На фиг. 2—5 приведены кривые усталости, рассчитанные по формуле (4), и соответствующие экспериментальные кривые или точки. Сравнение

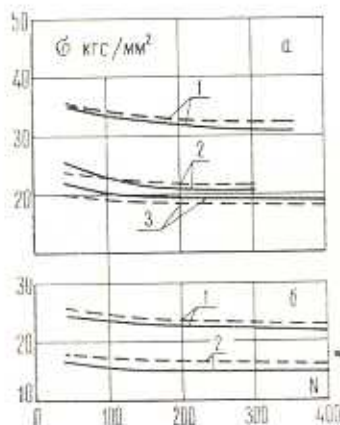


Фиг. 2. Растяжение стеклотекстолита, частота 10 цикл/мин, [5]. 1. ЭФ-32-301 на сочетании эпоксиной смолы с фенолоформальдегидной (по основе), $\sigma_{вр} = 40.5$ кгс/мм², 2. КАСТ-В на феноло-формальдегидной смоле (по основе), $\sigma_{вр} = 30.6$ кгс/мм², 3. То же, что и 2, по утку, $\sigma_{вр} = 15.5$ кгс/мм². — расчет, точки-эксперимент.

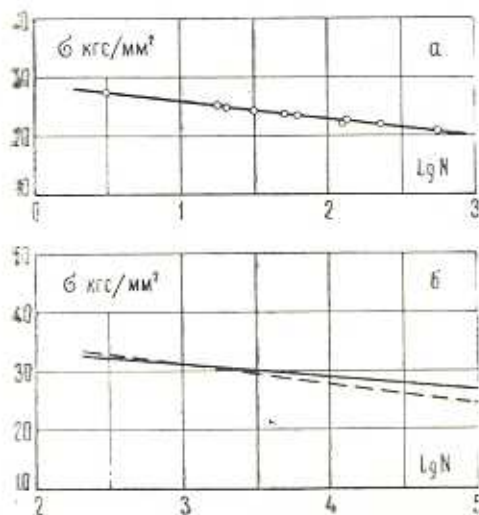
* Крайние точки соответствуют испытанию одного образца, остальные—трех образцов.

График зависимости (4) является прямой линией в двойной логарифмической системе координат, однако для конкретных значений $\beta = 0.05$ и 0.10 кривизна оказывается настолько малой, что и в приводимой здесь системе координат геометрическое место вычисленных точек графически изображается отрезком прямой.

этих результатов показывает, что по формуле (4) можно с достаточной точностью оценить циклическую прочность стеклопластиков в области мало-



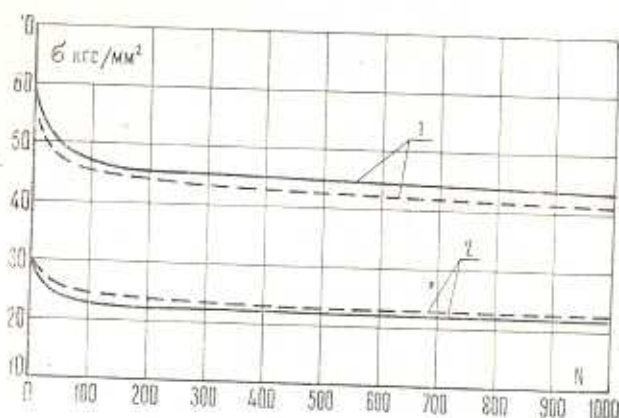
Фиг. 3. Оценка зависимости (4) по данным работы [6], частота 1 цикл/мин
 а. растяжение: 1. СВМ на эпокси-фенольном связующем (вдоль волокон), $\tau_{\text{вр}} = 43.0 \text{ кгс/мм}^2$, 2. стеклотекстолит на ткани АСТТ(6)-С₂-О и связующем ПН-1 (по основе), $\tau_{\text{вр}} = 28.6 \text{ кгс/мм}^2$, 3. СВМ на связующем БФ-4 (вдоль волокон), $\tau_{\text{вр}} = 24.0 \text{ кгс/мм}^2$. б. стеклотекстолит на ткани АСТТ(6)-С₂-В и связующем ПН-3 (по основе): 1. чистый изгиб, $\tau_{\text{ин}} = 30.7 \text{ кгс/мм}^2$, 2. сжатие, $\tau_{\text{сж}} = 21.7 \text{ кгс/мм}^2$. --- расчет, — эксперимент.



Фиг. 4. а. Стеклотекстолит горячего отверждения на эпоксидном связующем, растяжение по основе, $\tau_{\text{вр}} = 29.0 \text{ кгс/мм}^2$, частота 2 цикл/мин [7]. — расчет, \circ — эксперимент. б. Стеклотекстолит 33-18С, растяжение, $\tau_{\text{вр}} = 43.5 \text{ кгс/мм}^2$, частота 10 цикл/мин [9]. --- расчет, — эксперимент.

циклового нагружения на базе N от 1 до 10^5 циклов. Расхождение при этом носит случайный характер и по сравнению с фактическим значением циклической прочности не выходит за пределы 10%.

Вместе с тем оказывается, что не для всех стеклопластиков можно определить усталостную прочность по формуле (4) при значении степени $\beta=0,05$. Это может означать, что не для всех материалов допустимо условие подобия кривых усталости.



Фиг. 5. Чистый изгиб, частота 1 цикл/мин [6]. 1. СТЭР-1-30 на эпоксид-фенольном связующем и стеклоткани АСТТ(6)-С₂ комбинированной структуры, $\sigma_{\text{ли}} = 57,5 \text{ кгс/мм}^2$. 2. Стеклотекстолит параллельной структуры на смоле ПН-3 и ткани АСТТ(6)-С₂-В, $\sigma_{\text{ли}} = 31,3 \text{ кгс/мм}^2$. --- расчет, — эксперимент.

Как показывают расчеты (табл. 1 и 2), с точки зрения практического использования зависимости (4) стекловолокнистые материалы можно условно разбить на две группы: материалы, «нормально» и «слабо» сопротивляющиеся малоцикловому деформированию.

Для первой группы стеклопластиков значение коэффициента усталостной прочности материала

$$K = \frac{\sigma_c}{\sigma_0}$$

в малоцикловой области, например, на базе 10^4 циклов, не менее 0,6, а для второй группы — $K < 0,60$.

В табл. 1 и 2 для сравнения приведены расчетные и экспериментальные данные по усталостной прочности стеклопластиков, «нормально» и «слабо» сопротивляющихся малоцикловому деформированию. Для материалов первой группы показатель степени $\beta=0,05$, а для второй значение β принято вдвое больше — 0,10.

Как видно, для оценки малоцикловой прочности «слабо» сопротивляющихся стеклопластиков снова можно использовать формулу (4), но при значении β , равном 0,1. В этом случае разброс расчетных значений σ_y относительно фактически измеренных значений снова небольшой и имеет случайный характер.

«Нормальное» сопротивление малоциклому деформированию ($K > 0.60$), $\beta = 0.05$.

№ п/п	Тип стеклопластика	Ориент. прокладч. осн образца	Частота нагруж. цикл/мин	Вязк. нецелит. (число циклов N)	Предел прочн. $\sigma_{\text{п}} \text{ кг/см}^2$	Факт. устан. прочн. $\sigma_{\text{ф}} \text{ кг/см}^2$	Рассчет устан. прочн. $\sigma_{\text{р}} \text{ кг/см}^2$	Погреш. $\frac{\sigma_{\text{ф}} - \sigma_{\text{р}}}{\sigma_{\text{ф}}}$	Коэф. факт. устан. прочн. K	Литер. источ.	
											По осн.
1	На смоле ПН-1 и ткани АСТТ(6)—С ₂ —0		1	2000	28.4	17.0	19.4	+14.1	0.60	[6]	
2	СТЭР-1-30 на ткани АСТТ(6)—С ₂		1	300	32.0	23.0	24.0	+4.3	0.72	[6]	
3	СВАМ на связующем БФ-4		1	300	24.1	18.3	18.1	-1.1	0.76	[6]	
4	СВАМ на эпокси-фенольном связующем		1	300	43.0	28.8	32.4	+12.5	0.67	[6]	
5	Горячего отвержда. из эпоксида, связующем		2	500	29.0	20.6	21.2	-2.9	0.71	[7]	
6	33—18—С		10	10000	43.5	29.1	27.5	-5.5	0.67	[9]	
Пульсирующее растяжение											
7	На смоле ПН-3 и ткани АСТТ(6)—С ₂ —В		1	500	21.7	14.1	15.8	+12.0	0.65	[6]	
8	СТЭР-1-30 на ткани АСТТ(6)—С ₂		1	500	37.4	26.2	27.3	+4.2	0.70	[6]	
Симметричный чистый изгиб											
9	На смоле ПН-3 и ткани АСТТ(6)—С ₂ —В		1	2000	32.4	20.0	22.1	+10.5	0.60	[6]	
10	Параллельн. структ. на смоле ПН-3 и ткани АСТТ(6)—С ₂ —В		1	2000	31.3	18.8	21.4	+13.8	0.60	[8]	
11	СТЭР-1-30 на ткани АСТТ(6)—С ₂ параллельн. структ.		1	500	38.5	26.2	28.1	+7.3	0.68	[8]	
2	СТЭР-1-30 на ткани АСТТ(6)—С ₂ комбиниров. структ.		1	2000	57.5	40.8	39.2	-3.9	0.71	[8]	

Таблица 2
 „Слабое“ сопротивление малоцикловому деформированию ($K < 0,60$), $\beta = 0,10$

№ п.п.	Тип стеклопластика	Ориент. продольн. оси образца	База испыт. (число циклов N)	Предел прочн. $\sigma_{\text{пред}}$ кгс/см ²		Факт. устав. прочн. $\sigma_{\text{факт}}$ кгс/см ²		Расчет устав. прочн. $\sigma_{\text{расч}}$ кгс/см ²		Погреш. $\frac{\sigma_{\text{факт}} - \sigma_{\text{расч}}}{\sigma_{\text{факт}}}$, %	Коэф. устав. прочн. K
				по осн.	по утку	по осн.	по утку	по осн.	по утку		
1	МТБ на смоле ПН-1 и ткани Т	Перекрест. структура	300	25,0	25,0	12,9	12,9	14,1	14,1	+ 9,3	0,52
2	МТГ на смоле ПН-1 и ткани Т			Перекрест. структура	300	26,8	26,8	14,8	14,8	15,1	15,1
3	На смоле ПН-3 и ткани АСТТ(6)-С ₂ -О	По осн. По утку	2000	27,5	27,5	11,0	11,0	12,9	12,9	+17,3	0,40
4	На смоле ПН-1 и ткани АСТТ(6)-С ₃ -О		2400	18,4	18,4	10,0	10,0	8,4	8,4	-16,0	0,55
5	На смоле ПН-1 и ткани АСТТ(6)-С ₂		1500	30,0	30,0	15,0	15,0	14,4	14,4	- 4,0	0,50

Выводы. Предложена эмпирическая зависимость для оценки малоцикло-
вой усталостной прочности стеклопластиков. При этом сделаны допуще-
ния о корреляции циклической прочности только с пределом прочности ма-
териала и о подобии кривых усталости для различных условий деформи-
рования. Предлагаются два значения параметра эмпирической зависимости,
обусловленные степенью сопротивляемости стеклопластиков переменному
нагрузению. Последняя определяется коэффициентом усталостной прочно-
сти, по величине которой стеклопластики условно классифицированы на
«нормально» и «слабо» сопротивляющиеся малоцикловому деформи-
ванию. Установлено удовлетворительное совпадение расчетных данных с экс-
периментальными результатами.

Институт механики АН
Армянской ССР

Поступила 18 IV 1975

Ն. Ե. ՍԱՐԳՍՅԱՆ

ԱՊՍԿԵՊԼԱՍՏՆԵՐԻ ՍԱԿԱՎԱՅԻՎԱՅԻՆ ՀՈԳՆԱԾՈՒՄԻՆ ԱՄՐՈՒԹՅՈՒՆԸ
ԿԱՆՆԱՏԵՍԵՂՈՒ ԶԱՐՅԻ ՇՈՒՐՋԸ

Ա մ փ ո փ ու լ մ

Առաջարկվում է էմպիրիկ բանաձև ապակեպլաստիկների սակավացիկլային
հոգնածային ամրությունը դնահատելու համար: Արվել են ընդունելություն-
ներ, որոնց համաձայն տարրեր նյութերի և դեֆորմացիաների տեսակների հա-
մար կառուցվել են նման հոգնածային կորեր, ընդ որում նյութի ցիկլիկ ամ-
րությունը կախված է միայն նրա ամրության սահմանից: Առաջարկվում են
էմպիրիկ բանաձևի պարամետրի երկու արժեքներ, որոնք պայմանավորված
են փոփոխական բևեռավորման նկատմամբ ապակեպլաստիկի դիմադրողա-
կանության աստիճանով: Վերջինս որոշվում է հոգնածային ամրության պր-
ծակցով, ըստ որի ապակեպլաստիկը պայմանականորեն դասակարգված են
սակավացիկլային դեֆորմացմանը «նորմալ» և «թույլ» դիմադրող խմբերի:

Սահմանված է հաշվային տվյալների և հայտնի փորձնական արդյունք-
ների բավարար համընկնում:

ON PREDICTION OF LOW-CYCLE FATIGUE RIGIDITY
OF GLASS-FIBRE REINFORCED PLASTICS

N. E. SARKISIAN

S u m m a r y

An empiric power dependence to estimate fatigue rigidity of
glass-fibre reinforced plastics is suggested. Assumptions are made of
cyclic rigidity correlation with the rigidity limit of the material as
well as of similarity of fatigue curves for various materials and modes
of deformation.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коффин А. Ф. Циклические деформации и усталость металлов. В кн. Усталость и выносливость металлов. ИЛ, М., 1963.
2. Станюкович А. В., Никитин В. Н. Оценка сопротивления усталости сталей в упруго-пластической области при высокой температуре. В кн. Вопросы механической усталости. Машиностр., М., 1964.
3. Тавернелли, Коффин ма. Экспериментальное подтверждение обобщенного уравнения для оценки усталости при малом числе циклов. Тр. Американского об-ва инженеро-механиков, сер. техн. механика, 4, 1964.
4. Manson S. S. A simple procedure for estimating hightemperature low-cycle fatigue. Exptl. Mech. 1968, 8, № 8.
5. Пашиш Б. Н., Баргенов Г. М., Финогенов Г. П. Прочность пластмасс при повторным нагрузкам. Пласт. массы, № 11, 1960.
6. Смирнова М. К., Соколов Б. П., Сидорин Я. С., Иванов А. П. Прочность корпуса судна из стеклопластика. Судостр., Л., 1965.
7. Квасников Е. Н., Долганов Г. М. Влияние высоких растягивающих напряжений при повторных нагрузках на прочность и деформативность стеклопластиков. В кн. Инж. конструкции. Краткое содерж. докл. к XXV научн. конф. АИСИ, Л., 1967.
8. Глазов С. Ф. Деформируемость стеклопластиков при повторно-статическом изгибе. Пласт. массы, 1967, № 1.
9. Зайцев Г. П., Стрельцов В. С. Сопротивление стеклопластмасс деформированию и разрушению при статическом растяжении. В кн. Конструкционные свойства пластмасс. Машиностр., М., 1968.
10. James T. K., Appl F. J., Bert C. W. Low-cycle fatigue of a glass-fabric-reinforced plastic laminate. Exptl. Mech., 1968, 8, № 7.
11. Саркисян Н. Е. О влиянии термической обработки на усталостные свойства нетканого стеклопластика. Изв. АН АрмССР, Механика, т. 25, № 5, 1972.