

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 Коэффициента [1]

$$\sigma_{\text{ст}} N^{\alpha} = C \quad (1)$$

устанавливающая связь между пластической деформацией разрушения и соответствующим числом циклов при малоцикловом 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 ($\Delta \epsilon_p$).

В некоторых случаях [2 и др.] при расчетах по формуле (1) берется общая деформация цикла, поскольку при высоких значениях долговечности 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

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

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

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

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

$$\sigma_r = 0.5 D^{1/n} N^{-1/n} + \frac{1.75 \sigma_s}{E} N^{-0.25}$$

где σ_s — 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 $2\sigma_s$.

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

Отмеченные выше уравнения кривой малоциклового усталости или варианты по отношению к виду циклической деформации, частоте нагружения и не учитывают изменений, 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 оказалась трудной задачей из-за 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 образцов перед разломом по сравнению с металлами значительно меньше. Кроме того, вследствие особенностей макроразрушения волокнистого материала определение сужения 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 свойства, определяемые путем кратковременного испытания материала на простой вид деформации. Такими характеристиками могут быть предел прочности σ_k , 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

$$\sigma_n = \sigma_k \cdot N^{\beta} \quad (4)$$

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 эпоксифенольном связующем.

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

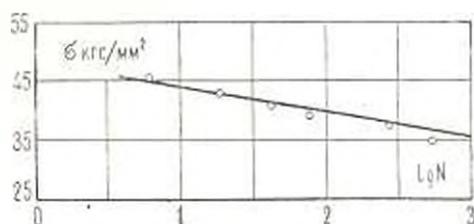
Опыты проводились при комнатной температуре.

Предел прочности стеклопластика при кратковременном растяжении определялся по результатам испытаний 5 образцов: $\sigma_k = 49,85 \pm 1,70$ кгс/мм².

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.

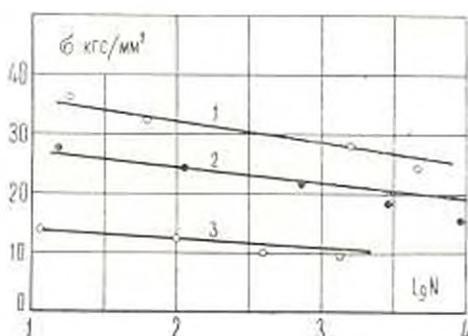
На фиг. 1 приведены кривая усталости, рассчитанная по формуле (4) и экспериментальные точки, характеризующие фактическую прочность данного стеклопластика в описанных условиях малоциклового нагружения. Как видно, соответствие между расчетными и экспериментальными данными вполне удовлетворительное, наибольшее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



Фиг. 1. СВМ 1:1 на эпокси-фенольном связующем, растяжение вдоль волокон, $\sigma_{\text{вр}} = 19,85 \text{ кгс/мм}^2$, частота 3 цикла/мин. — расчет, \circ — 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 цик/мин.

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

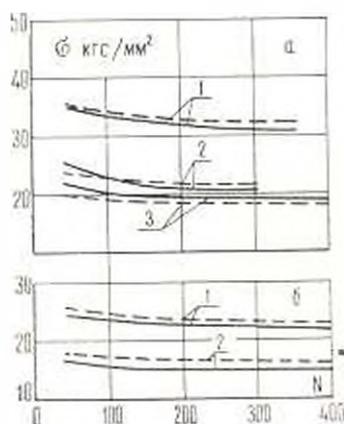


Фиг. 2. Растяжение стеклопластика, частота 10 цикла/мин. [5] 1. ЭФ-32-301 на сочетании эпоксиной смолы с фенолформальдегидной (по основе), $\sigma_{\text{вр}} = 40,5 \text{ кгс/мм}^2$, 2. КАСТ-В на феноло-формальдегидной смоле (по основе), $\sigma_{\text{вр}} = 30,6 \text{ кгс/мм}^2$, 3. То же, что и 2, но откут, $\sigma_{\text{вр}} = 15,5 \text{ кгс/мм}^2$. — расчет, точки-эксперимент.

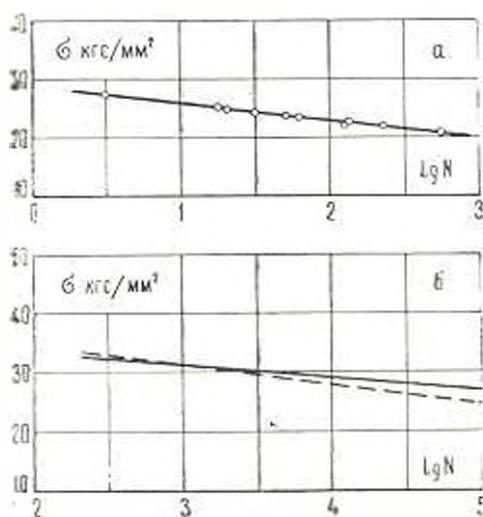
* Крайние точки соответствуют повреждению одного образца, остальные — трех образцов.

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 переломом прямой.

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



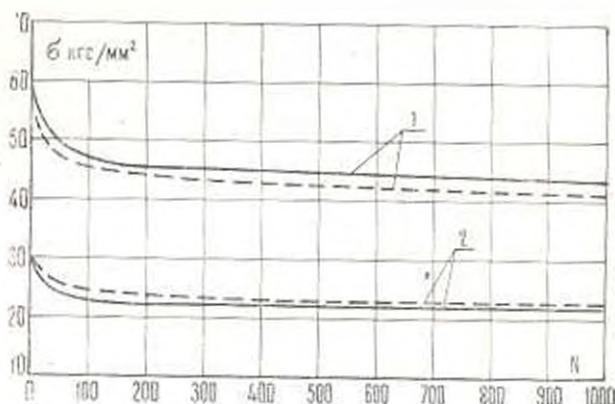
Фиг. 3. Оценка зависимости (4) по данным работы [6], частота 1 цикл/мин
 а. растяжение: 1. СВМ на эпокси-фенольном связующем (вдоль волокон), $\sigma_{вр} = 430 \text{ кг/мм}^2$, 2. стеклотекстолит на ткани АСТТ(6) С₂-О и связующем ПН-1 (по основе), $\sigma_{вр} = 28,6 \text{ кг/мм}^2$, 3. СВМ на связующем БФ-4 (вдоль волокон), $\sigma_{вр} = 24,0 \text{ кг/мм}^2$. б. стеклотекстолит на ткани АСТТ(6) С₂-В и связующем ПН-3 (по основе): 1. чистый изгиб, $\sigma_{из} = 30,7 \text{ кг/мм}^2$, 2. сжатие, $\sigma_{сж} = 21,7 \text{ кг/мм}^2$. - - - расчет, — эксперимент.



Фиг. 4. а. Стеклотекстолит горячего отверждения на эпоксидном связующем, растяжение по основе, $\sigma_{вр} = 29,0 \text{ кг/мм}^2$, частота 2 цикл/мин [7]. — расчет, ○ — эксперимент. б. Стеклотекстолит 33-18С, растяжение, $\sigma_{вр} = 43,5 \text{ кг/мм}^2$, 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 распад, частота 1 цикл./мин [6]. 1. $1^{\circ}T_{11}^{\circ}$ —1—30 по эпоксидно-фенольному связующему и стекловолокни АСТТ(6)—С₂ комбинированной структуры, $\sigma_{0.2} = 57,5$ кг/мм². 2. Стекложестолит параллельной структуры на основе ПН-3 и тканью АСТТ(6)—С₂—В, $\sigma_{0.2} = 31,3$ кг/мм². --- расчет, — эксперимент.

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

Для первой группы стеклопластиков значение коэффициента усталостной прочности материала

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

в малоцикловой области, например, на базе 10^6 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_0 относительно фактически измеренных значений силы небольшой и имеет случайный характер.

„Нормальное“ сопротивление малоцикловому деформированию ($K = 0.60$), $R = 0.05$.

Таблица 1

№ п/п	Тип стеклопластика	Ориент. продольн. оси образца	Частота нагруж. цикла, $ж/с$	Время испыт. (число циклов N)	Предел прочн. $\sigma_{\text{пр}}$, $кгс/мм^2$	Факт. устал. прочн. $\sigma_{\text{уст}}$, $кгс/мм^2$	Расчет устал. прочн. $\sigma_{\text{р}}$, $кгс/мм^2$		Коэф. факт. устал. прочн. K	Автор. источ.
1	На смоле ПН-1 и ткани АСТТ(6) — $C_2 - 0$	По оси.	1	2000	28.4	17.0	19.4	+ 14.1	0.60	[6]
2	СТЭР-1-30 на ткани АСТТ(6) — C_1	„	1	300	32.0	23.0	24.0	+ 4.3	0.72	[6]
3	СВАМ на связующем БФ-4	Вдоль волокон	1	300	24.1	18.3	18.1	- 1.1	0.76	[6]
4	СВАМ на эпокси-фенольном связующем	Вдоль волокон	1	300	43.0	28.8	32.4	+ 12.5	0.67	[6]
5	Горячего отвержд. или аноксид. связующем	По оси.	2	500	29.0	20.6	21.2	- 2.9	0.71	[7]
6	33-18-C	„	10	10000	43.5	29.1	27.5	- 5.5	0.67	[9]
Пульсирующее сжатие										
7	На смоле ПН-3 и ткани АСТТ(6) — $C_2 - В$	По оси.	1	500	21.7	14.1	15.8	+ 12.0	0.65	[6]
8	СТЭР-1-30 на ткани АСТТ(6) — C_2	„	1	500	37.4	25.2	27.3	+ 4.2	0.70	[6]
Симметричный чистый изгиб										
9	На смоле ПН-3 и ткани АСТТ(6) — $C_2 - В$	По оси.	1	2000	32.1	20.0	22.1	+ 10.5	0.60	[6]
10	Параллельн. структ. на смоле ПН-3 и ткани АСТТ(6) — $C_2 - В$	„	1	2000	31.3	18.8	21.4	+ 13.6	0.60	[8]
11	СТЭР-1-30 на ткани АСТТ(6) — C_1 параллельн. структ.	„	1	500	38.5	26.2	28.1	+ 7.3	0.68	[8]
12	СТЭР-1-30 на ткани АСТТ(6) — C_2 комбиниров. структ.	„	1	2000	57.5	40.8	39.2	- 3.9	0.71	[8]

Таблица 2

„Слабое“ сопротивление малоциковому деформированию ($K < 0.60$), $\nu = 0.10$

п.п. №№	Тип стеклопластика	Ориент. продольной оси образца	Базис испит. (число циклов N)	Продольная прочность $\sigma_{\text{пр}}$, кгс/мм ²	Факт. усталост. прочн. $\sigma_{\text{уст}}$, кгс/мм ²	Расчет. усталост. прочн. $\sigma_{\text{р.уст}}$, кгс/мм ²	Погреш.	Кэфф. усталост. прочн. K
Пульвирующее растяжение, частота 1 цикл/мин [6]								
1	МТБ на смоле ПН-1 и ткани Т	Перекрест. структура	300	25,0	12,9	14,1	+ 9,3	0,52
2	МТГ на смоле ПН-1 и ткани Т	Перекрест. структура	300	26,8	14,8	15,1	+ 2,0	0,55
3	На смоле ПН-3 и ткани АСТТ(6) - С ₂ - О	По оси.	2000	27,5	11,0	12,9	- 17,3	0,40
4	На смоле ПН-1 и ткани АСТТ(6) - С ₂ - О	По углу	2400	18,4	10,0	8,4	- 16,0	0,55
5	На смоле ПН-1 и ткани АСТТ(6) - С ₂	По оси.	1500	30,0	15,0	14,4	- 4,0	0,50

Выводы. Предложена эмпирическая зависимость для оценки малоцикловой усталостной прочности стеклопластиков. При этом сделаны допущения о корреляции циклической прочности только с пределом прочности материала и о подобии кривых усталости для различных условий деформирования. Предлагаются два значения параметра эмпирической зависимости, обусловленные степенью сопротивляемости стеклопластиков переменному нагружению. Последняя определяется коэффициентом усталостной прочности, по величине которой стеклопластики условно классифицированы на «нормальные» и «слабые» сопротивляющиеся малоцикловому деформированию. Установлено удовлетворительное совпадение расчетных данных с экспериментальными результатами.

Институт механики АН
Армянской ССР

Поступила 18 IV 1975

Ն. Ե. ՍԱՐԳՍՅԱՆ

ԱՊՐԱՆԵՊԷԿԱՏՏՆԵՐԻ ՄԱՐՈՒՄԵՏԻՎԱՅԻՆ ՀՈՂՆԱԾՈՒՄԻ ԱՄՐՈՒՄՅՈՒՄԸ
ԿԱՆԱՍՏՈՒԹՅԱՆ ՀԱՐՑԻ ՇՈՒՐՉՐԸ

Ա. մ. փ. ո. փ. ո. Վ.

Առաջարկվում է կմայրիկ բանաձև ապակեպլաստների սակավաջիկային հոգնածային ամրությունը կախաբերել համար: Արվել են բնդունելություններ, որոնց համաձայն աարբեր նյութիերի և դեֆորմացիաների սեսակների համար կատուցվել են նման հոգնածային կոբեր, բնդ որում նյութի ցիկլիկ ամրությունը կախված է միայն նրա ամրության սահմանից: Առաջարկվում են կմայրիկ բանաձևի պարամետրի երկու արժեքներ, որոնք պայմանավորված են փոփոխական բնունոփորման նկատմամբ ապակեպլաստների դիմադրողականության աստիճանով: Վերջինս որոշվում է հոգնածային ամրության գործակցով, ըստ որի ապակեպլաստները պայմանականորեն դասակարգված են սակավաջիկային դեֆորմացիաներ ընդմեջ և սխույթ դիմադրող խմբերի:

Սահմանված է հաշվային սվյալների և հոյանի փորձնական արդյունքների 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. Степнякович 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. Тавеломаш, Коффин мл. Экспериментальное подтверждение обобщенного уравнения для оценки усталости при малом числе циклов. Тр. Американского об-ва инженерии-механиков, сер. тем. механика, 4, 1964.
4. Manson S. S. A simple procedure for estimating hightemperature low-cycle fatigue. Exptl. Mech., 1968, 8, № 8.
5. Нишин Б. И., Бартошев Г. М., Филимонов Г. П. Прочность пластмасс при повторным нагрузкам. Пласт. массы, № 11, 1960.
6. Свиридова М. К., Соколов Б. П., Сидорин Я. С., Павлов А. П. Прочность корпуса судна из стеклопластика. Судостр., Л., 1965.
7. Ковалева Е. Н., Долынов 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. ЛИСИ, Л., 1967.
8. Гиллов С. Ф. Деформируемость стеклопластиков при повторно-статическом изгибе. Пласт. массы, 1967, № 1.
9. Зацев Г. П., Степанов 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 сетчатого стеклопластика. Изв. АН АрмССР, Механика, т. 25, № 5, 1972.