

УДК 539.43 : 620.171.3 : 678

## ОБ ОДНОМ СПОСОБЕ УСКОРЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

САРКИСЯН Н. Е.

Существующие критерии усталостного разрушения композитных материалов (КМ) не дают возможности рассчитать прочность образца хотя бы в простейшем случае одноосного нагружения, основываясь при этом лишь на характеристиках механических свойств материала, соответствующих кратковременному нагружению.

Поэтому широкое разнообразие видов современных КМ, существенная изменчивость их усталостных свойств в зависимости от многих технологических факторов, температурно-силовых и других эксплуатационных условий, на практике вызывают необходимость проведения большого числа испытаний, требующих значительной затраты дорогостоящих материалов, средств и времени. С этой точки зрения понятен интерес, проявляемый к различным методам сокращения усталостных испытаний материалов. Эти методы, как правило, основываются на том или ином критерии разрушения, либо на корреляционной связи, устанавливаемой между изменением определенного физического параметра испытываемого образца и временем до его разрушения (долговечностью). Тем самым, все предложенные методы ускоренного испытания, в свою очередь, требуют проведения того или иного количества усталостных испытаний.

Впервые в работе [1] был предложен способ ускоренного определения долговечности полимерных КМ в области многоциклового усталости. Методика основана на инвариантности критической температуры циклического разогрева материала от напряжения и на линейном законе роста температуры в зависимости от числа циклов нагружения. Последний наблюдается на основной (по времени) стадии выносливости испытываемого образца. Дальнейшее уточнение этого подхода, его обобщение на случаи изменения ряда других физических параметров и разработка специальной методики ускоренного определения критических значений этих параметров по испытанию одного образца для разных уровней напряжения способствовали значительному расширению области прогнозирования усталостной долговечности [2, 3]. Указанные методики дали большой эффект и успешно применяются во многих работах по определению прочности полимерных КМ.

В работах [4, 5] предложен критерий оценки циклической проч-

ности КМ в области многоциклового усталости, основанный на знании кривой статического нагружения «напряжение-деформация» ( $\sigma \sim \varepsilon$ ), получаемой в идентичных условиях нагружения. При этом установлено, что наиболее близкая корреляция усталостной прочности  $\sigma^*$  существует с так называемым пределом пропорциональности  $\sigma^*$ , а не с пределом прочности материала  $\sigma_u$  или с модулем упругости  $E$ , как это считается традиционно. В качестве напряжения  $\sigma^*$  принимается напряжение, соответствующее началу отклонения статической кривой  $\sigma \sim \varepsilon$  от линейного участка этой зависимости. Поэтому коэффициент усталостной прочности материала определяется отношением

$$K^* = \frac{\sigma^*}{\sigma_u} \quad (1)$$

где при симметричном цикле нагружения величина  $\sigma^*$  принимается как меньшее из значений, соответствующих диаграммам статического растяжения и сжатия (при инклинометрическом изгибе — по диаграммам статического изгиба).

Указанная выше корреляционная зависимость легла в основу разработки ускоренного метода определения анизотропии усталостной прочности полимерных КМ при симметричном цикле осевого растяжения-сжатия и плоского изгиба [5]. Метод предусматривает кратковременные статические испытания образцов, вырезанных в различных направлениях  $\varphi$ . Усталостные испытания проводятся для образца только одной ориентации  $\varphi$ . Усталостная прочность в других направлениях вычисляется по значениям  $\sigma^*$  в предположении постоянства коэффициента усталости  $K^*$  для всех направлений  $\varphi$ , рассчитанного по формуле (1). Этот метод позволял с погрешностью около 10% оценить анизотропию усталостной прочности при двух-, трехкратном сокращении объема испытаний [5].

Однако, на наш взгляд, методика [1, 5] не может быть успешно применена для целого ряда КМ, поскольку она не учитывает существенную анизотропию коэффициента прочности КМ при многоцикловом нагружении. Кроме этого, ряд КМ, имеющих однонаправленную структуру армирования, при статическом деформировании в направлении волокон вплоть до разрушения образца проявляют почти линейный характер зависимости  $\sigma \sim \varepsilon$ . Для этих материалов достоверный выбор напряжения  $\sigma^*$  усложняется и, видимо, в качестве  $\sigma^*$  придется принимать значение предела прочности  $\sigma_u$ . Это приведет к искусственному значительному снижению коэффициента усталостной прочности  $K^*$ , что затруднит объективную оценку усталостного сопротивления материала.

Рассмотрим возможность построения метода ускоренного определения усталостной прочности полимерных композитных материалов, основанного на известных временных критериях разрушения. В настоящей работе для этой цели используются теории прочности [6] и [7], выражающиеся соответственно экспоненциальной и степенной функциями напряжения и долговечности.

Временная зависимость, основанная на термофлуктуационной теории прочности твердых тел, имеет вид [6]:

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{u_0 - \gamma \sigma}{kT}\right) \quad (2)$$

где  $\tau_0$  — постоянная, близкая к периоду тепловых колебаний атомов;  
 $u_0$  — энергия элементарного акта процесса разрушения, являющаяся для полимерных материалов энергией химических связей;  
 $k$  — постоянная Больцмана;  
 $\gamma$  — коэффициент, характеризующий структуру полимерного материала;  
 $T$  — абсолютная температура среды;  
 $\tau$  — время разрушения.

Для условий изотермического деформирования тел, заменив время  $\tau$  числом циклов до разрушения  $N$ , зависимость (2) можно представить в простейшем виде

$$\ln N = \frac{2,3}{a} (\lg A - \lg \sigma) \quad (3)$$

где  $A$  и  $a$  — новые параметры, выражающиеся через постоянные формулы (2) и температуру  $T$ .

Рассмотрим теорию длительной прочности полимерных материалов, основанную на принципе метода размерностей [7]. В случае симметричного растяжения — сжатия с постоянной амплитудой напряжения  $\sigma$  и частотой  $\omega$  количество циклов до разрушения по этой теории может быть определено из общего выражения

$$N = F\left(\frac{\sigma T_g}{T}, a_T \omega\right) \quad (4)$$

где искомая функция  $F$  зависит от двух переменных — гомологической температуры  $T_g$  (в частном случае, температуры стеклования) и частоты напряжения  $\omega$ .

Коэффициент времени  $a_T$  должен быть найден экспериментально по кривым ползучести при различных температурах [7].

Для большого диапазона температур и напряжений функция  $F$  аппроксимируется степенной функцией вида [7]:

$$F = C \cdot \left(\frac{T}{\sigma T_g}\right)^\beta \quad (5)$$

где  $\beta \gg 1$  и  $C$  являются новыми постоянными данного материала.

Снова принимая температуру испытания  $T$  постоянной, в частности, равной осредненной по времени температуре циклического разогрева, по (4) и (5) получаем расчетную зависимость простейшего вида

$$N = B \sigma^{-\beta} \quad (6)$$

где  $B$  — новая постоянная, определяемая для конкретных условий нагружения.

Статистический анализ экспериментальных данных в большинстве работ показывает, что кривые Велера зависимости многоциклового усталостной прочности полимерных КМ независимо от вида деформации, частоты напряжения и свойства анизотропии лучше всего описываются уравнением

$$\sigma = a - b \cdot \lg N \quad (7)$$

где  $a$  и  $b$  — параметры, зависящие от физико-механических свойств испытываемого материала и условий циклического нагружения.

Как видно, между эмпирической формулой (7) и формулой (3), являющейся упрощением зависимости (2), нет абсолютно никакой разницы. В отличие от (6) оба эти уравнения при стремлении значения циклического напряжения к нулю дают долговечность, стремящуюся не к бесконечности, а к определенной величине. В зависимости (7) логарифм долговечности стремится к отношению  $\frac{a}{b}$ , которое, кстати, может служить определенной характеристикой чувствительности материала к процессу усталости.

Мы считаем, что зависимости (6) и (7), являющиеся простейшими выражениями общих закономерностей (2) и (4), могут быть успешно применены для оценки в первом приближении циклической прочности полимерных КМ. При этом имеется в виду, что эмпирические параметры  $a$  и  $b$  (или  $B$  и  $\beta$ ) в интегральной форме неявным образом отражают все возможные изменения физико-механических свойств материала, которые несомненно имеют место в процессе длительного нагружения и обусловлены особенностями КМ и условиями испытания.

Предлагаемый нами способ сокращения объема испытаний фактически является одним из возможных методов ускорения усталостных испытаний. Этот способ основывается на экспериментальном определении значений параметров  $a$  и  $b$  (или  $B$  и  $\beta$ ) путем построения лишь начального участка кривой Велера  $\sigma \sim \lg N$ .

Как известно, мало- и многоцикловая усталость материалов определяется существенными различиями в механизмах разрушения. Поэтому, очевидно, значения указанных выше параметров должны быть определены отдельно для каждого вида усталости.

Для расчета циклической прочности в области малоциклового усталости КМ при определении параметров формул (6) и (7) кратковременные испытания рекомендуется проводить при возможно высоких значениях циклического напряжения.

Известно, что кривая многоциклового усталостной прочности полимерных КМ чаще всего описывается одним участком линейной зависимости (7). Появление начального по отношению к нему линейного участка, имеющего больший уклон в системе координат  $(\sigma, \lg N)$ , менее характерно. Как известно, этот промежуточный участок отражает изменения в механизме разрушения, происходящие при переходе малоциклового усталости к многоциклового. Протяженность этого участка кривой Велера для полимерных КМ обычно не превышает нескольких

десятков тысяч циклов. Поэтому для расчета многоциклового усталости нами рекомендуется циклические напряжения выбирать такими, чтобы соответствующие долговечности оказались примерно в диапазоне от 20—30 тысяч до 100 тысяч циклов, то есть за пределами возможной сталии перехода между мало- и многоциклового усталостью.

Для двух задаваемых значений напряжения  $\sigma$  определяется число циклов  $N$  до разрушения образца ( $\sigma_1 > \sigma_2$ ,  $N_1 < N_2$ ). В зависимости от разброса предела прочности материала (следовательно, и разброса усталостной прочности) при каждом значении напряжения может быть испытано 3—7 образцов. Используя среднearифметические значения циклического напряжения и долговечности по двум уравнениям (7), находим искомые значения параметров  $a$  и  $b$  (либо по уравнениям (6) параметры  $B$  и  $\beta$ ). Таким образом, количество опытов, необходимое для вычисления указанных параметров, будет не больше того, что требовалось бы для построения начального участка кривой  $\sigma \sim \lg N$ .

Воспользуемся предложенным здесь способом, а также методикой ускоренных испытаний [4, 5] и оценим анизотропию многоциклового усталостной прочности стеклотекстолита на основе ткани Т-10 и связующего ЭДТ-10\*.

Испытания по предложенному способу ускоренного определения усталостной прочности стеклотекстолита были проведены примерно 2,5 года спустя после изготовления материала. Образцы были вырезаны в направлении основы и утка ткани (угол вырезки  $\varphi$  соответственно 0 и 90°) и под углом  $\varphi = 45^\circ$ . Опыты проводились в нормальных температурно-влажностных условиях среды при гармоническом пульсирующем цикле растяжения частотой 1200 цикл/мин. Подробнее экспериментальные данные по усталостным свойствам этого стеклотекстолита и методика испытаний описаны в работе [8].

Статические прочностные и деформативные характеристики стеклотекстолита, соответствующие указанному выше сроку хранения образцов, приведены в табл. 1. Указаны значения предела прочности ( $\sigma_{\text{в}}$ ) и деформации разрушения ( $\varepsilon_{\text{р}}$ ), а также напряжения  $\sigma^*$  и деформации  $\varepsilon^*$ , которые соответствуют начальному перелому графика статической зависимости  $\sigma \sim \varepsilon$ .

Для сравнения значений многоциклового усталостной прочности, подсчитанных по ускоренным методам, с экспериментальными данными в качестве последних используем корреляционные уравнения  $\sigma \sim \lg N$ , построенные в работе [8]. В частности, при пульсирующем растяжении стеклотекстолита в направлении основы ткани это уравнение имеет вид

$$\sigma = 514,6 - 66,08 \cdot \lg N \quad (\text{МПа})$$

\* Предложенный способ успешно опробован также при анализе результатов испытания ориентированных стеклопластиков типа СВАН и некоторых других полимерных КМ. Соответствующие результаты сравнения расчетных и экспериментальных данных не отличаются от ожидаемых и поэтому здесь не приводятся.

Таблица 1

Оценка усталостной прочности стеклотекстолита по методике [4,5]

Угол $\varphi$ вырезки, град	Характеристики статической кривой $\sigma-\epsilon$				Коэффициент $K^*$ при числе циклов $N$				Усталостная прочность $\sigma$ на базе $N$ , МПа			
	$\sigma^*$ , МПа	$\epsilon^*$ , $10^{-3}$	$\sigma_{br}$ , МПа	$\epsilon_{br}$ , $10^{-3}$	10*	10*	10*	2 · 10*	10*	10*	10*	2 · 10*
0	247.1	8.0	25.6	19.5	1.02	0.751	0.482	0.401	250.2	184.2	118.1	98.3
45	19.6	0.8	44.7	48.0	—	—	—	—	62.3	54.5	45.6	43.0
90	84.3	3.0	64.8	25.0	—	—	—	—	19.8	14.7	9.4	7.8
									133.2	107.3	81.4	73.6
									84.7	62.6	40.2	33.4

По указанному уравнению и напряжению  $\sigma^*$  из табл. 1 при  $\varphi=0^\circ$  подсчитываются значения коэффициента усталостной прочности  $K^*$  для различных долговечностей  $N$ . Далее, с помощью этих значений  $K^*$  и напряжений  $\sigma^*$ , соответствующих  $\varphi=45$  и  $90^\circ$ , по заданным  $N$  определяются напряжения  $\sigma$  для этих направлений. Результаты подсчета, который соответствует методике [5], приведены в табл. 1. Здесь в графах 10—13 в числителе указаны экспериментальные, а в знаменателе расчетные значения циклической прочности. Как видно из этих данных, расхождение между расчетом и экспериментом велико. Поэтому применение указанного метода ускоренного определения многоциклового усталостной прочности при отнулевом растяжении нецелесообразно. Следует также отметить, что если здесь напряжение  $\sigma^*$ , соответствующее  $\varphi=0^\circ$ , принимать, например, вдвое меньше, то для ориентации  $\varphi=90^\circ$  расхождение значительно уменьшится (в среднем 13,7% на базе  $N=10^4+2 \cdot 10^4$  циклов). Однако, даже в этом гипотетическом случае для угла вырезки  $\varphi=45^\circ$  расхождение между расчетными и экспериментальными данными сохранилось бы на прежнем высоком уровне (3—5 раз). Объяснение этого, на наш взгляд, заключается в том, что указанная методика не учитывает существенного влияния анизотропии КМ на коэффициент усталостной прочности при многоциклового нагружении.

Рассмотрим возможность использования формул (6) и (7)\* для приближенной оценки многоциклового усталостной прочности рассматриваемого здесь стеклотекстолита.

В табл. 2 приведены опытные значения напряжений  $\sigma$  и соответствующие им долговечности  $N$ . В графах 3 и 5 в скобках указано количество образцов, которое было испытано для построения кривых усталости по предложенному способу. Как видно из табличных данных, общее время  $t$ , необходимое для построения полной усталостной кривой Велера, в рассматриваемых опытах сократилось в среднем в 15

\* То же, что и зависимость (3).

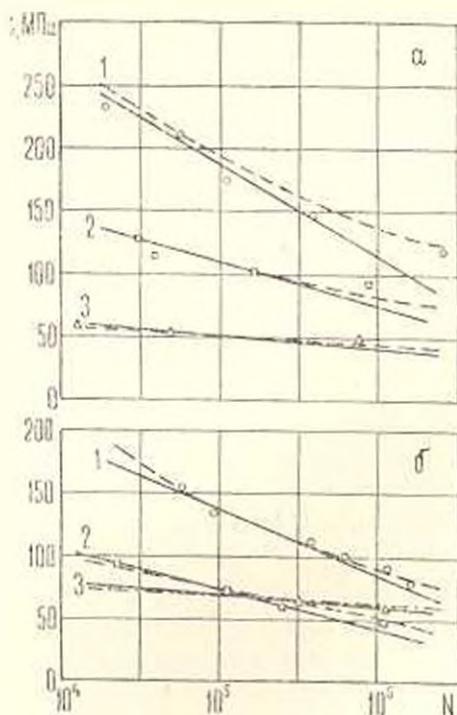
раз ( $n/n^*$ ). Вместе с тем, в 2-3 раза сокращается также количество разрушаемых образцов ( $n/n^*$ ). При таком существенном выигрыше в сокращении объема усталостных испытаний одновременно обеспечивается также и достаточно удовлетворительное согласие между расчетными и экспериментальными значениями усталостной прочности.

Таблица 2  
Оценка усталостной прочности стеклотекстолита по предложенному методу

№ п	$\varphi$ град.	$\sigma_1$ МПа	$N_1$ цикл	$\sigma_2$ МПа	$N_2$ цикл	$a$	$b$	$\lg R$	$\beta$	$n/n^*$	$t/t^*$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	210.8(3)	50000	186.3(4)	129000	51.577	6.964	13.742	6.749	3	12
2	45	59.0(3)	13000	33.7(3)	19000	9.768	0.915	15.109	14.125	2	18
3	90	129.2(3)	30000	110.3(6)	101000	29.654	3.678	13.061	7.663	2	7
4	0	154.8(3)	58000	112.1(3)	92000	46.690	6.487	11.202	5.873	3	20
5	45	72.3(3)	30000	65.4(3)	325000	10.407	0.678	25.211	23.896	2	5
6	90	91.4(5)	22000	74.0(3)	112000	20.336	2.502	11.839	7.725	3	13

Примечание: Стрелки 4-6 соответствуют испытаниям образцов с концентратором напряжения в виде центрального кругового отверстия.

На фиг. 1 построены графики, иллюстрирующие приемлемость предлагаемого метода (пунктирные и сплошные линии соответствуют формулам (6) и (7)). Точками на графиках обозначены среднеарифметические значения усталостной прочности и долговечности, полученные в основных испытаниях [8].



Фиг. 1

Сравнение расчетных кривых усталости с экспериментальными статистическими кривыми показывает, что формулы (6) и (7) могут быть с успехом использованы для прогнозирования многоциклового усталостной прочности полимерных КМ. Действительно, отклонение расчетных данных от экспериментальных носит случайный характер, практически не зависит от выбора расчетной формулы и на базе  $N = 10^3 \div 2 \cdot 10^6$  циклов в среднем не превышает 5%, лишь в отдельных случаях доходит до 10—15%.

Как видно из графиков на фиг. 1, предлагаемый метод ускоренного определения многоциклового усталостной прочности полимерных КМ приемлем для различных углов  $\varphi$  ориентации нагрузки, а также для образцов с концентратором напряжений.

Следует отметить, что если зависимости типа (6) и (7) можно использовать для ускоренного определения усталостной прочности композитов в условиях многоциклового нагружения, то, очевидно, имеется еще больше оснований для успешного их применения при оценке малоциклового усталостной прочности КМ.

ՎՈՐՊՈՅԻՏ ԿԱՌԹԵՐԻ ՅԻՉՐԻ ԱՐՐՈՒԹՅԱՆ ՈՐՈՇՈՒՄ  
ԵՐ ԱՐԱՔ ԵՎԱՆՈՒՄ ԱՍՏԻՆ

Ն. Ե. ՍԱՐԿԻՍԻԱՆ

Ա մ փ ո փ ո ս մ

*Առաջարկվում է կոմպոզիտ նյութերի բազմացիկլային հողնածաշին ամրության անիզոտրոպիայի սրտշման տրադ կղանակ՝ հիմնված հարաբերական և ամրության միջև երկպարամետրային կապերի վրա: Սահմանված է հաշվային և փորձնական սվլյայնների բավարար համաձայնություն:*

ABOUT A METHOD OF SPEEDY DETERMINATION OF CYCLIC STRENGTH OF COMPOSITE MATERIALS

N. E. SARKISIAN

S u m m a r y

The method of speedy determination of anisotropy of multicyclical fatigue strength of composite materials is suggested, based on two-parametrical dependence between durability and strain. It is shown that the calculated and experimental data are in good agreement.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Олдырев П. П.* Определение усталостной долговечности пластмасс по температуре саморазогрева.—Механика полимеров, 1967, № 1, с. 111—117.
2. *Олдырев П. П., Парфен В. М., Кожар В. И.* Уточнение методики определения усталостной долговечности полимерных материалов по температуре разогрева.—Механика полимеров, 1977, № 5, с. 906—913.
3. *Олдырев П. П.* Новый метод ускоренных испытаний композитных материалов усталость в режиме мягкого нагружения.—Заволжская лаборатория, 1980, № 9, с. 847—852.
4. *Олдырев П. П.* О корреляции между статической и усталостной прочностью армированных пластиков.—Механика полимеров, 1973, № 3, с. 468—474.
5. *Олдырев П. П.* Об оценке анизотропии усталостной прочности композитных материалов.—Механика композитных материалов, 1982, № 11, с. 57—61.
6. *Журков С. И., Нарзулаев Б. И.* Временная зависимость прочности твердых тел.—Журн. техн. физики, 1953, 23, № 10, с. 1677—1689.
7. *Ильющин А. А., Олыбаев П. И.* О критерии длительной прочности полимеров.—Механика полимеров, 1966, № 6, с. 828—832.
8. *Саркисян Н. Е.* Анизотропия циклической прочности и разогрев стеклотекстолита при наличии концентратора.—Изв. АН АрмССР, Механика, 1979, 32., № 1, с. 63—70.

Ереванский политехнический институт  
им. К. Маркса

Поступила в редакцию  
16.11.1983