

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 испытуемого 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 испытуемого 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 σ^* существует с так называемым пределом пропорциональности σ^* , а не с пределом прочности материала σ_n или с модулем упругости E , как это считается традиционно. В качестве напряжения σ^* принимается напряжение, соответствующее началу отклонения статической кривой $\sigma \sim \varepsilon$ от линейного участка этой зависимости. Поэтому коэффициент усталостной прочности материала определяется отношением

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

где при симметричном цикле нагружения величина σ^* принимается как меньшее из значений, соответствующих диаграммам статического растяжения и сжатия (при циклическом 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 φ . Усталостные испытания проводятся для образцов только одной ориентации φ . Усталостная прочность в других направлениях вычисляется по значениям σ^* в предположении постоянства коэффициента усталости K^* для всех направлений φ , рассчитанного по формуле (1). Этот метод позволил с погрешностью около 10% оценить анизотропию усталостной прочности при двух-, трехкратном сокращении объема испытаний [5].

Однако, на наш взгляд, методика [4, 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 σ^* усложняется и, видимо, в качестве σ^* придется принимать значение предела прочности σ_n . 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 τ_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;
 γ —коэффициент, характеризующий структуру полимерного материала;
 T —абсолютная температура среды;
 τ —время разрушения.

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

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

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 σ и частотой ω количество циклов до разрушения по этой теории может быть определено из общего выражения

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

где искомая функция F зависит от двух переменных—гомологической температуры T_K (в частном случае, температуры стеклования) и частоты напряжения ω .

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]:

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

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 испытуемого 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 β) 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 β) 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 усталостного намина 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 стадии перехода между мало- и многоциклового усталостного.

Для двух задаваемых значений напряжения σ 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 среднесрифметические значения циклического напряжения и долговечности по двум уравнениям (7), находим искомые значения параметров a и b (либо по уравнениям (6) параметры B и β). 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 φ 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. Более подробные 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 ($\sigma_{\text{в.р.}}$) и деформации разрушения ($\varepsilon_{\text{в.р.}}$), а также напряжения σ^* и деформации ε^* , которые соответствуют начальному перегибу 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 СВМ и некоторых других полимерных КМ. Соответствующие результаты сравнения расчетных и экспериментальных данных не отличаются от обсуждаемых и поэтому здесь не приводятся.

Таблица 1

Оценка усталостной прочности стеклотекстолита по методике [4,5]

Угол φ вырезки, град	Характеристики статической кривой $\sigma \sim \varepsilon$				Коэффициент K^* при числе циклов N				Усталостная прочность σ на базе N , МПа			
	σ^* , МПа	$\varepsilon^*, \times 10^{-3}$	$\sigma_{0.01}$, МПа	$\varepsilon_{0.01}, \times 10^{-3}$	10^4	10^5	10^6	$2 \cdot 10^6$	10^4	10^5	10^6	$2 \cdot 10^6$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0	247,1	8,0	525,6	19,5	1,021	0,751	0,482	0,401	250,2	184,2	118,1	98,3
45	19,6	0,8	204,7	48,0	—	—	—	—	62,3	54,5	45,6	43,0
90	84,3	3,0	364,8	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 σ^* 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 σ^* , соответствующих $\varphi=45$ и 90° , по заданным N определяются напряжения σ 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 σ^* , соответствующее $\varphi=0^\circ$, принимать, например, вдвое меньше, то для ориентации $\varphi=90^\circ$ расхождение значительно уменьшится (в среднем 13,7% на базе $N=10^4+2 \cdot 10^6$ 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 многоцикловом нагружении.

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

В табл. 2 приведены опытные значения напряжений σ 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 (t/n^*). Вместе с этим, 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.

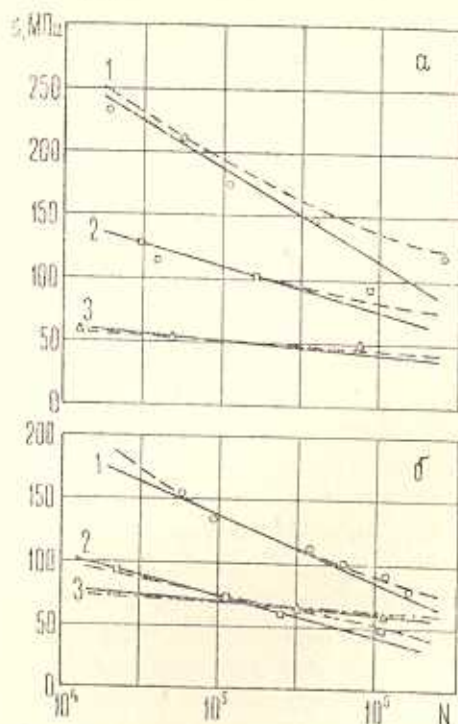
Таблица 2

Оценка усталостной прочности стеклотекстолита по предложенному методу

п/п	φ град.	σ_1 МПа	N_1 цикл.	σ_2 МПа	N_2 цикл.	a	b	$\lg B$	β	n/n^*	t/t^*
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	210,8(3)	56000	186,3(4)	129000	54,577	6,964	13,742	6,749	3	12
2	45	59,0(3)	13000	53,7(3)	49000	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	142,1(3)	92000	46,690	6,487	11,202	5,373	3	20
5	45	72,3(3)	30000	65,4(3)	325000	10,407	0,678	25,211	23,898	2	5
6	90	91,4(5)	22000	74,0(3)	112000	20,336	2,532	11,839	7,725	3	13

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

На фиг. 1 построены графики, иллюстрирующие приемлемость предлагаемого метода (пунктирная и сплошная 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 $N=10^4 \div 2 \cdot 10^6$ 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 φ 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.

ԿՈՄՊՈԶԻՏ ԿՅՈՒԹԵՐԻ ՅԻՓԱԿ ԱՄՐՈՒԹՅԱՆ ՈՐՈՇՄԱՆ ՄԵ ԱՐԱԳ ԵՂԱՆԱԿԻ ՄԱՍԻՆ

Ե. Ե. ՍԱՐԿԻՍԻԱՆ

Ա մ փ ն փ ու մ

Առաջարկվում է կոմպոզիտ նյութերի բազմացիկլային հոգնածային ամրության անիզոտրոպիայի որոշման արագ եղանակ՝ հիմնված հարատևության և ամրության միջև երկպարամետրային կապերի վրա: Սահմանված է հաշվարկի և փորձնական ավյալների 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., Парфеев В. М., Комар 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 на усталость в режиме мягкого нагружения.—Заводская лаборатория, 1980, 46, № 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. Н., Нарзулаев Б. П. Временная зависимость прочности твердых тел.—Журн. техн. физики, 1953, 23, № 10, с. 1677—1689.
7. Ильюшин А. А., Огибалов П. И. О критерии длительной прочности полимеров.—Механика полимеров, 1966, № 6, с. 828—832.
8. Саркисян Н. Е. Анизотропия циклической прочности и разогрева стеклотекстолита при излучении концентратора.—Изв. АН АрмССР, Механика, 1979, 32, № 4, с. 63—70.

Ереванский политехнический институт
им. К. Маркса

Поступила в редакцию
16.III.1983