

УДК 620.171.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА АНИЗОТРОПИЮ
ПРОЧНОСТИ И ДЕФОРМАТИВНОСТИ СТЕКЛОТЕКСТОЛИТА
ПРИ СТАТИЧЕСКОМ И МАЛОЦИКЛОВОМ РАСТЯЖЕНИИ

[ДУРГАРЬЯН С. М.], МУСАЕЛЯН С. Л., САРКИСЯН Н. Е.

Одной из предпосылок для успешного применения полимерных композиционных материалов в технике является комплексное исследование механического поведения материалов и конструкций из них при различных силовых и температурных режимах эксплуатации.

Анизотропия механических свойств полимерных композиционных материалов исследована достаточно хорошо [1, ..., 6 и др.]. Зависимость анизотропии прочности и деформативности от температуры как при статическом, так и при циклическом нагружении мало исследована. Известна лишь одна работа [4], где исследовано влияние температуры на усталостную прочность при кручении однонаправленного и перекрестно-армированного ($\varphi = \pm 30^\circ$ и $\pm 45^\circ$) углепластика.

В настоящей работе исследуется анизотропия прочности и деформативности стеклотекстолита при статическом и малоцикловом растяжении в условиях комнатной и повышенных температур.

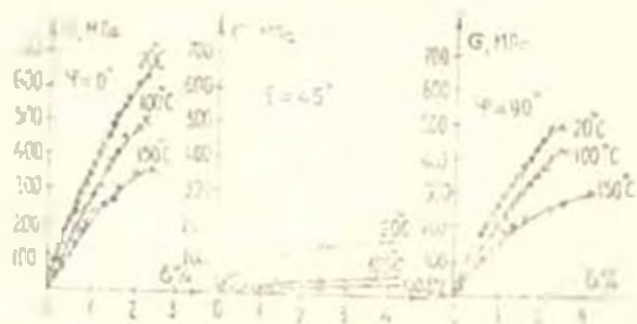
Исследования проводились на плоских образцах стеклотекстолита, изготовленного методом прессования на основе ткани ТСУ 8/3—ВМ—78 и эпоксидного связующего ЭДТ-10. Образцы, вырезанные из листов толщиной 5,5 мм по направлениям утка ($\varphi = 0^\circ$) и основы ($\varphi = 90^\circ$) ткани, а также под углом 45° , имели форму двусторонних лопаток. Ширина и длина рабочего участка образца составляли 15—70 мм. Общая длина—250 мм, ширина и длина хвостовых частей—45 мм, радиус закругления к галтелям—75 мм.

В образцах, вырезанных под углом 45° , неизбежен «Эффект перерезанных нитей». Полученные на этих образцах результаты можно использовать лишь для качественной оценки параметров, характеризующих поведение материала в указанном направлении. В этих образцах при растяжении в основном работает полимерное связующее в то время, как в реальных конструкциях работают также и волокна, расположенные под углом 45° .

1. *Статическое растяжение.* Испытания на статическое растяжение проводились на разрывной машине ЦДМ—10/90 при скорости холостого перемещения захватов 5 мм/мин. Исследование анизотропии модуля упругости в зависимости от температуры проводились путем ступенчатого нагружения образца.

Для создания стационарного температурного поля с повышенной температурой было использовано специальное нагревательное устройство. Контроль температуры осуществлялся при помощи медноконстантановой термопары, изготовленной из проволоки диаметром 0,2 мм. Термопара механически прижималась к лицевой поверхности рабочей части образца и непосредственно была соединена с измерительным прибором типа МР-6403 ИП.

Для измерения деформации было изготовлено специальное приспособление. Деформации измерялись на базе 10 мм с помощью механических тензометров.



Фиг. 1 — Диаграммы растяжения стеклотекстолита при различных значениях температуры среза

На фиг. 1 приведены экспериментальные кривые $\sigma \sim \epsilon$ для трех температур $t = 20, 100$ и 150°C . Эти кривые иллюстрируют влияние температуры на анизотропию кратковременной статической прочности и деформативности композита. Результаты экспериментов аппроксимированы линейной функцией (1) и степенной зависимостью

$$\sigma = A \epsilon^n \quad (1)$$

где A — некоторая постоянная, n — коэффициент деформационного упрочнения материала.

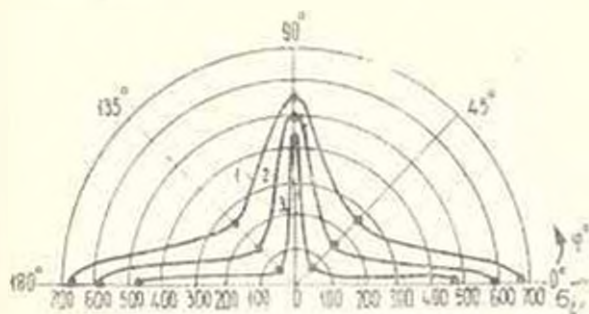
Для определения модуля упругости E при линейной аппроксимации и параметров A и n при аппроксимации степенной зависимостью вида (1) использовался метод наименьших квадратов. Обработка данных испытаний проведена на ЭВМ ЕС 1022.

По результатам аппроксимаций зависимости предела прочности от температуры нагрева t для различных углов ориентации могут быть представлены формулами

$$\begin{aligned} \varphi = 0^\circ: \sigma_x(t) &= 663,5 + 0,37t - 0,01126t^2 \text{ (МПа)} \\ \varphi = 45^\circ: \sigma_x(t) &= 272,3 - 0,75t - 0,00416t^2 \text{ (МПа)} \\ \varphi = 90^\circ: \sigma_x(t) &= 562,1 - 0,38t - 0,00329t^2 \text{ (МПа)} \end{aligned} \quad (2)$$

На фиг. 2 приведена круговая диаграмма для прочности стеклотекстолита при температурах $t = 20, 100$ и 150°C .

Независимо от температуры разрушение стеклотекстолита в направлениях армирования происходит хрупко. При $\varphi = 45^\circ$ наблюдается вязкохрупкое разрушение, поскольку в этом случае и основное, и дополнительное направление работы имеют одинаковое значение.

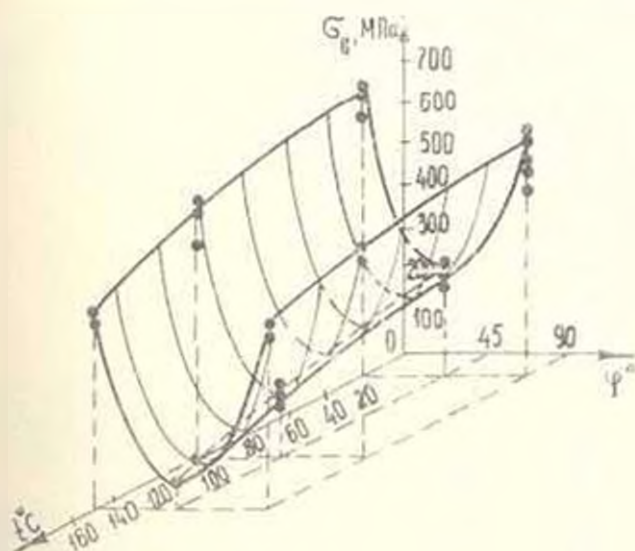


Фиг. 2—Круговая диаграмма влияния температуры на предел прочности стеклотекстолита
1. При $t = 20^\circ\text{C}$, 2. При $t = 100^\circ\text{C}$, 3. При $t = 150^\circ\text{C}$

Следует отметить, что повышение температуры мало влияет на величину деформации разрушения при кратковременном статическом растяжении стеклотекстолита в направлениях основы и утка ткани.

По полученным опытным данным в прямоугольной декартовой системе координат σ , φ , t построена предельная поверхность прочности в зависимости от угла ориентации нагрузки относительно волокон и температуры окружающей среды. Эта поверхность приведена на фиг. 3.

Полученные основные результаты приведены в табл. 1.



Фиг. 3—Предельная поверхность анизотропии по числам стеклотекстолита

Механическая характеристика	О р и е н т а ц и я, °								
	90			45			0		
	температура, °C								
	20	100	150	20	100	150	20	100	150
Предел прочности $\sigma_{\text{в}}$, МПа	545	465	373	256	126	54.0	642	561	465
Модуль упругости E , МПа	25000	20000	13250	9230	1200	550	20000	25450	19500
Параметр A , МПа	10600	13000	4800	1550	600	150	12000	18500	15000
Параметр n	0.80	1.00	0.76	0.82	0.78	0.7	0.78	0.92	0.8
Коэффициент Пуассона	0.07	—	—	0.46	—	—	0.14	—	—
Отношение $\sigma_{\text{в}}/E$	1	0.85	0.65	1	0.49	0.21	1	0.87	0.7
Отношение E_1/E_2	1	0.80	0.53	1	0.13	0.06	1	0.80	0.7

Данные табл. 1 показывают, что предел прочности $\sigma_{\text{в}}$ и модуль упругости при линейной аппроксимации непрерывно уменьшаются с увеличением температуры. Влияние повышенных температур на снижение предела прочности относительно меньше, чем на снижение модуля упругости. При этом исключительно важно влияние угла ориентации линий действия нагрузки относительно волокон. Так, например, отношение при 20 и 100 $^{\circ}\text{C}$ составляет 1,27 при $\varphi=0^\circ$, а при $\varphi=45^\circ$ —7,81. В этом случае при $t=150^\circ\text{C}$ сопротивляемости композита деформациям практически нечернывится ($E_{150}/E_1=0,06$), что можно объяснить размягчением связующего и неустойчивостью его механических характеристик в пределах температуры стеклования.

В табл. 2 приведены отношения пределов прочности и модуля упругости по направлениям армирования для разных температур

Таблица 2

Отношение	20	100	150
$\sigma_{\text{в}}/E_1$	0.85	0.83	0.91
$E_{\text{в}}/E_1$	0.78	0.78	0.66

Из данных табл. 2 видно, что повышение температуры в диапазоне 20–150 $^{\circ}\text{C}$ мало влияет на степень анизотропии стеклотекстолита прочности и по модулю упругости материала в направлениях армирования.

2. Пульсирующее растяжение. Испытания на пульсирующее растяжение в режиме «мягкого» нагружения ($P_{\text{нп}} \rightarrow \text{Const}$) проводились на испытательной машине ЦДМ-10, дополнительно оборудованной

томатическими переключателями. Частота нагружения зависела от максимальной нагрузки цикла и была в пределах $1 \div 2$ цикл/мин. Испытания проводились на базе 10^3 циклов при коэффициенте асимметрии $r=0,03 \div 0,1$.

В процессе длительного циклического нагружения с помощью специально изготовленного приспособления были измерены экстремальные значения удлинений образца, соответствующие максимальному и минимальному значениям нагрузки.

Результаты проведенных испытаний обрабатывались с использованием методов математической статистики. При этом предполагалось, что существует линейная корреляционная связь между максимальным напряжением цикла σ_{max} и логарифмом числа циклов $\lg N$. Для оценки справедливости этого допущения были вычислены коэффициенты корреляции и критерий линейности.

Кривые усталости $\sigma_{max} \sim \lg N$ были построены с помощью корреляционного уравнения

$$\sigma_{max} = \bar{\sigma} + \frac{S_{\sigma}}{S_{\lg N}} r_{\sigma \lg N} (\lg N - \overline{\lg N}) \quad (3)$$

где $\bar{\sigma}$ — среднее значение напряжений цикла,

S_{σ} , $S_{\lg N}$ — среднеквадратичное отклонение напряжений и логарифма долговечностей;

$r_{\sigma \lg N}$ — коэффициент корреляции;

$\overline{\lg N}$ — среднее значение логарифма долговечности.

Уравнение (3) можно привести к виду

$$\sigma_{max} = a - d \lg N \quad (4)$$

где a и d — параметры, зависящие от механических характеристик испытываемого материала и цикла нагружения.

Были вычислены следующие статистические параметры: ошибка критерия линейности

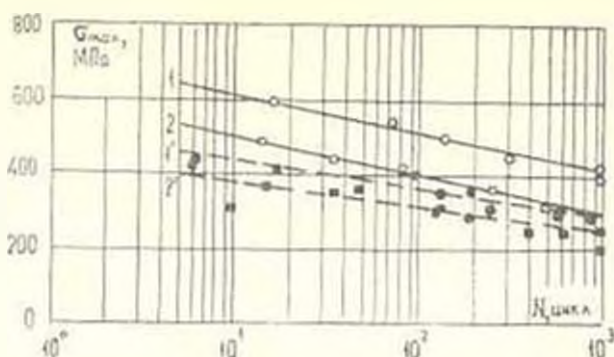
$$\xi = 1 - r_{\sigma \lg N} \quad (5)$$

основная ошибка критерия линейности

$$\eta = \sqrt{\frac{1 - r_{\sigma \lg N}}{n - 1}} \quad (6)$$

и отношение ошибки критерия линейности к его основной ошибке. Отношение ξ/η оказалось в пределах $0,3 \div 1,2$, что указывает на допустимость использования линейной связи $\sigma_{max} \sim \lg N$.

Кривые малоциклового усталости стеклотекстолита при пульсирующем растяжении, иллюстрирующие влияние температуры и анизотропии на усталостную прочность, приведены на фиг. 4, а параметры кривой усталости и данные по прочности материала при статическом растяжении — в табл. 3.



4 — Влияние температуры и амплитуды на малоцикловую усталостную прочность стеклотекстолита

Таблица 3

Ориентация, °C	0		90	
	20	100	20	100
Величина				
Параметр a , МПа	726.3	513.4	603.7	412.1
Параметр d , МПа	103.4	75.0	103.3	63.1
Коэффициент корреляции r_{11}	-0.9899	-0.9112	-0.7320	-0.8707
Критерий линейности ϵ	0.0201	0.1141	0.2642	0.2419
Отношение a/d	1.13	0.91	1.12	0.95
Коэффициент усталостной прочности K	0.647	0.517	0.549	0.537
Предел усталости на базе 10^3 циклов σ_{-1} , МПа	416	288	290	253

Данные табл. 3 показывают, что как при нормальной, так и при повышенной температурах параметр a в формуле (4) мало отличается от предела прочности σ_b при той же температуре. Отклонения для $\varphi = 0^\circ$ и 90° составляют соответственно 1% и 5%. С повышением температуры, как и следовало ожидать, происходит уменьшение значения параметра a . Это отражает влияние температуры на снижение чисто усталостных свойств материала. Об этом говорят и значения коэффициента усталостной прочности K , определяемые отношением

$$K(N_k) = \frac{\sigma_{-1}(N_k)}{\sigma_b} \quad (7)$$

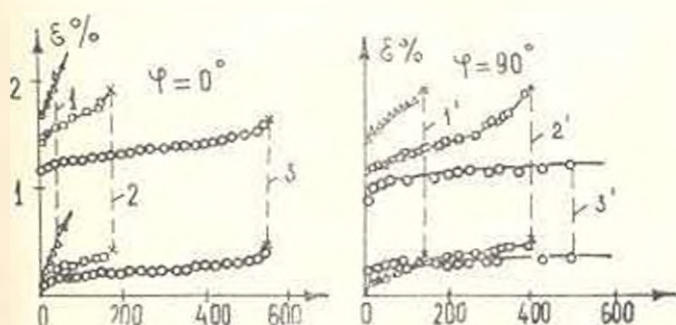
где N_k — базовое число циклов нагружения.

На базе долговечности $N_b = 10^3$ циклов, при $\varphi = 0^\circ$, коэффициент K при нормальной температуре оказался равным 0.65, а при $t = 100^\circ\text{C}$ — 0.52, то есть на 20% ниже. Следует отметить, что и при повышенной температуре испытанный стеклотекстолит обладает достаточно высокой степенью сопротивляемости малоциклового разрушению.

Исследовано влияние температуры на анизотропию деформативных свойств стеклотекстолита при малоциклоном растяжении. То обстоятельство, что в зависимости от угла ориентации (при одном и том же относительном уровне напряжения $\sigma/\sigma_{\max}$, или одинаковом абсолютном значении напряжения σ) долговечность N может отличаться на один-два порядка, существенно затрудняет эквивалентное сравнение деформативных свойств.

На фиг. 5 приведены семейства экспериментальных кривых, позволяющих зависимость экстремальных деформаций от числа циклов нагружения для различных уровней напряжений $\sigma_{\max}$.

Приведенные кривые фактически представляют кривые циклической ползучести материала. Эти кривые можно разделить на три характерных участка:



Фиг. 5 — Кривые циклической ползучести стеклотекстолита

1 $\sigma_{\max} = 400$ МПа,

2 $\sigma_{\max} = 350$ МПа,

3 $\sigma_{\max} = 300$ МПа,

1' $\sigma_{\max} = 320$ МПа

2' $\sigma_{\max} = 250$ МПа

3' $\sigma_{\max} = 200$ МПа

а) начальный участок с убывающей скоростью деформации;

б) участок с установившейся скоростью деформации;

в) конечный участок, предшествующий поломке образца, где деформации растут с несколько возрастающей скоростью. Протяженность того или иного участка на графике зависимости $\epsilon \sim N$ зависит от величины напряжения $\sigma_{\max}$. Наибольшую протяженность имеет второй участок.

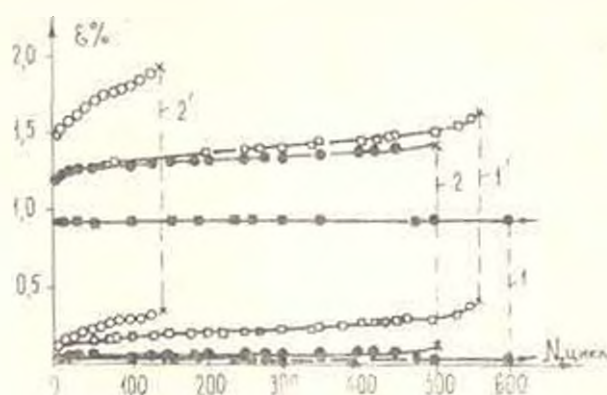
Для качественного сравнения деформативности материала в зависимости от угла ориентации φ и температуры среды на фиг. 6 приведены зависимости $\epsilon \sim N$ для одних и тех же экстремальных напряжений цикла ($\sigma_{\max} = 320$ МПа, $\sigma_{\min} = 17$ МПа). При $\varphi = 0^\circ$ и $t = 20^\circ$ практически отсутствует деформация ползучести, в то время как при температуре 100°C , начиная от первого цикла нагружения до разрушения, максимальная деформация растет от 1,15% до 1,63%, то есть на 30%. При $\varphi = 90^\circ$ и $t = 100^\circ\text{C}$ этот рост составляет 26%.

Особый интерес представляет изменение циклического модуля упругости в ходе переменного нагружения при вышеуказанных температурах. Под циклическим модулем упругости принимается

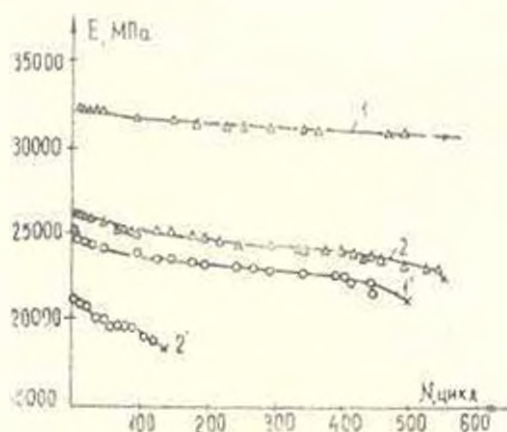


$$E = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{\epsilon_{\max} - \epsilon_{\min}}$$

(8)



Фиг. 6 — Влияние температуры и анизотропии на циклическую ползучесть стеклотекстолита
1 и 2 — $t = 20^\circ\text{C}$, $\varphi = 0^\circ$ и 90°
1' и 2' — $t = 100^\circ\text{C}$, $\varphi = 0^\circ$ и 90°



Фиг. 7 — Влияние температуры и анизотропии на циклический модуль упругости
1 и 2 — $t = 20^\circ\text{C}$, $\varphi = 0^\circ$ и 90°
1' и 2' — $t = 100^\circ\text{C}$, $\varphi = 0^\circ$ и 90°

В целях оценки влияния анизотропии и температуры среды на изменение циклического модуля упругости на фиг. 7 для вышеуказанных значений экстремальных напряжений приведены зависимости E — для $t = 20^\circ$ и 100°C . Как видно из фиг. 7, повышение температур сопровождается снижением долговечности циклического модуля упругости, а также увеличением скорости убывания последнего.

Для оценки влияния температуры на усталостные свойства материала в табл. 4 приведены отношения характеристик усталостных свойств при вышеуказанных температурах

Таблица 4

Отношение	Температура, °C	
	20	160
$\sigma_{\parallel}^{90} / \sigma_{\perp}^{90}$	0,85	0,83
$\sigma_{\parallel}^{45} / \sigma_{\perp}^{45}$	0,84	0,86
$\sigma_{\parallel}^{0} / \sigma_{\perp}^{0}$	1,0	0,84
$K_{\parallel}^{90} / K_{\perp}^{90}$	0,85	1,04
$\sigma_{\parallel}^{00} / \sigma_{\perp}^{00}$	0,72	0,88

Как видно из данных табл. 4, температура практически не влияет на анизотропию механических свойств материала и направлений армирования.

INVESTIGATION OF TEMPERATURE INFLUENCE ON ANISOTROPY OF THE COMPOSITE STRENGTH AND DEFORMATION UNDER STATIC AND LOW-CYCLE STRETCHING

DURGARIAN S. M., MUSAEIAN S. L., SARKISIAN N. E.

ՋԵՐԵՍԱՍԻՆԱԿԱՆ ԱՇԽԵՑՈՒԹՅԱՆ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԻ ԱՐԲՐՈՒԹՅԱՆ ԵՎ
ԴԵՖՈՐՄԱՏԻՎՈՒԹՅԱՆ ԱՆԻՑՈՏՐՈՊԻՈՒԹՅԱՆ ՎՐԱ ՈՍԱՏՈՒ ԵՎ
ԿՐԻՆՎՈՂ ՁԳՄԱՆ ԴԵՊՐԵՍԻՅ

ԴՈՐԴԱՐԻԱՆ Ս. Մ., ՄՍԱԵԼԻԱՆ Ս. Լ., ՏԱՐԿԻՍԻԱՆ Ն. Ե.

Ա Ն Ք Ր Ա Ն Ո Ւ Մ

Աշխատանքում փորձնականորեն հետազոտված է շերտային պաշար ուղղանկյունը ապակեաւրապակալ աւորոթյան և դեֆորմատիվային անիզոտրոպիայի վրա ինչպես ստատիկ, այնպես էլ կրկնվող բեռնավորումների դեպքում: Տեսչ է տրվում, որ անիզոտրոպիայի աստիճանը երկրաչափական դիաֆոր աւորոթյուններով էապես չի փոխվում շերտային պաշար աւորոթյան դեպքում:

ЛИТЕРАТУРА

1. Ашкенази Е. К. Анизотропия машиностроительных материалов.—Л.: Машиностроение, 1969. III с.
2. Ашкенази Е. К., Гинюл Э. В. Анизотропия конструкционных материалов.—Справочник. Л.: Машиностроение, 1980. 248 с.
3. Дургариан С. М., Саркисян Н. Е., Мусесян С. Л. Прочность и деформативность углепластиков при статическом и циклическом растяжении.—Материалы отечественной Всесоюзной научно-технической конференции «Прочность, жесткость и технологичность изделий из композиционных материалов». Ереван, изд. ЕГУ, 1981, т. 1, с. 249—254.
4. Замбаладзе Л. К., Рабинович А. Л. Влияние температуры и анизотропии на упруг-

ние константы ориентированных стеклопластиков — Механика полимеров, 1969, № 6, с. 1026—1032.

5. Сиркичян Н. Е. Анизотропия модуля упругости и деформативности стеклопластика при растяжении. — Механика полимеров, 1976, № 3, с. 425—429.
6. Тарнопольский Ю. М., Кинци Т. Я. Методы статических испытаний армированных пластиков — М. Химия, 1981, 272 с.

Институт механики АН Армении

Поступила в редакцию
25 V 1990