

Н. Е. САРКИСЯН

АНИЗОТРОПИЯ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ И РАЗОГРЕВА
СТЕКЛОТЕКСТОЛИТА ПРИ НАЛИЧИИ КОНЦЕНТРАТОРА

Как известно, уже в простейшем случае растяжения полосы с круглым отверстием закон равномерного распределения напряжений вблизи отверстия нарушается. При этом напряженное состояние становится двуосным и у края отверстия возникает пик напряжения (эффект концентрации напряжений). Для гетерогенных материалов, в частности, стеклопластиков, разрушение отдельного звена (например, волокна) приводит к перераспределению напряжений по всему сечению и, в конечном счете, к тенденции непрерывного сглаживания пика напряжений.

Исследованию эффекта концентрации напряжений в стеклопластиках при кратковременном статическом нагружении посвящен ряд работ, из которых следует отметить исследования авторов [1, 2]. В меньшей степени изучено влияние концентратора напряжений на изменение усталостной прочности композитов. Имеющиеся в литературе данные недостаточны и, главным образом, соответствуют симметричному растяжению-сжатию материала вдоль волокон в области многоциклового усталости. Основными исследованиями в этом направлении являются работы [3]. Анизотропии механических свойств материала учитывалась лишь в работе [4].

В настоящей работе исследуется влияние концентратора напряжений в виде отверстия на анизотропию прочности стеклотекстолита при растяжении в области мало- и многоциклового усталости. Рассмотрено также влияние концентратора на изменение циклического разогрева материала.

Объектом для испытаний служил стеклотекстолит, изготовленный методом прессования на основе ткани ТСУ 8/3 и связующего ЭДТ-10Г.

Опыты проводили на плоских образцах, вырезанных из листов стеклотекстолита толщиной 3,8—4,2 мм. Образцы имели форму двусторонней лопатки с радиусом закругления к галтелям 75 мм. Ширина и длина рабочего участка образца составляла 15 и 50 мм. В качестве концентратора напряжений служило центральное отверстие диаметром 4 мм, просверленное перпендикулярно к плоскости стеклоткани. Отношение диаметра отверстия к ширине образца в неослабленном сечении, как и в [3], составило примерно $1/4^*$.

Испытание образцов производилось в течение промежутка времени 0,5—1,5 года после изготовления материала. Температура и относительная

* Влияние изменения этого отношения применительно к пределу прочности стеклопластика для различных условий подробно изучено в [1, 2] и др.

влажность окружающей среды за весь период были в пределах $22 \pm 3^\circ\text{C}$ и $67 \pm 5\%$.

Для учета анизотропии механических свойств материала испытывали образцы, вырезанные вдоль основы и утка ткани ($\varphi = 0^\circ$ и 90°) и в диагональном направлении ($\varphi = 45^\circ$).

Испытания на мало- и многоцикловое растяжение проводили в режиме нагружения, характеризующемся постоянной нагрузкой опыта, при частоте 1 и 1200 цикл/мин. Циклическое растяжение с малой частотой осуществляли на разрывной машине статического деформирования ЦДМ-10, для этой цели дополнительно оборудованной автоматическими переключателями. Испытания на многоцикловую усталость проводили на гидропульсаторе ЦДМПу-10. Усталостные испытания вели на базе соответственно 10^3 и $2 \cdot 10^5$ циклов нагружения.

В качестве основного показателя концентрации напряжений вблизи отверстия ниже рассматривается эффективный коэффициент концентрации K , который для общего случая равен

$$K_r = \frac{\sigma}{\sigma^*}$$

где σ — прочность гладкого образца (без концентратора);

σ^* — номинальная (условная) прочность образца, имеющего концентратор напряжения;

r — коэффициент асимметрии нагружения, определяемый отношением напряжений цикла σ_{\min} и σ_{\max} .

Для предела прочности эффективный коэффициент концентрации напряжений равен

$$K_{r,1} = \frac{\sigma_n}{\sigma_n^*}$$

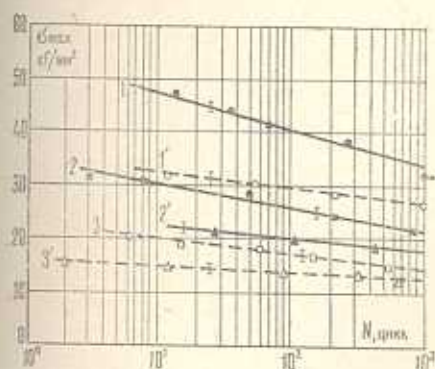
Применительно к усталостной прочности на отнулевое растяжение величину коэффициента K вычисляли для определенной долговечности

$$K_0 = \frac{\sigma_{\max}(N)}{\sigma_{\max}^*(N)}$$

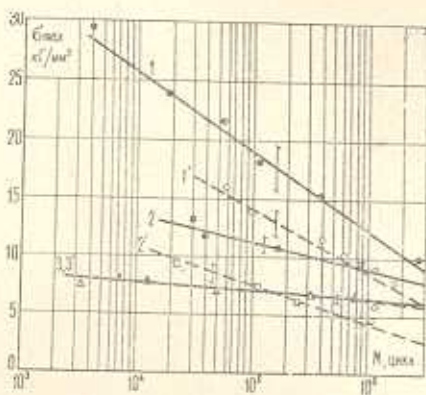
В табл. 1 приведены экспериментальные данные, показывающие влияние рассмотренного здесь концентратора на изменение кратковременной и усталостной прочности стеклотекстолита в зависимости от ориентации нагрузки. В каждом направлении для определения предела прочности было испытано 5—18 образцов, а для построения усталостной кривой Велера (фиг. 1 и 2) по 14—20 образцов (всего испытано более 270 образцов).

При кратковременном статическом растяжении отверстие диаметром 4 мм вызывает сравнительно меньшее изменение прочности при $\varphi = 45^\circ$ и большее изменение, когда нагрузка действует в направлении утка ткани. Это можно объяснить тем, что при $\varphi = 45^\circ$ ярко проявляется нелинейно вязко-упругое свойство связующего, приводящего к перераспределению

напряжений в образцах, имеющих концентратор. У плоских образцов, вырезанных вдоль утка ткани, волокна поперечного направления (по основе их в несколько раз больше, чем по утку) на себя нагрузку не воспринимают. Более того, они вызывают добавочные местные концентрации напряжений [5]. Этим, на наш взгляд, следует объяснить более высокое значение эффективного коэффициента K по направлению $\varphi = 90^\circ$.



Фиг. 1. Анизотропия малоциклового прочностного на растяжение 1, 2, 3 — $\varphi = 0^\circ, 90^\circ$ и 45°



Фиг. 2. Анизотропия многоциклового прочностного на растяжение 1, 2, 3 — $\varphi = 0^\circ, 90^\circ$ и 45°

На фиг. 1 и 2 показаны усталостные диаграммы Велера*, построенные по линейным корреляционным уравнениям общего вида

$$\sigma_{\max} = a - d \lg N$$

Параметры этого уравнения для каждой серии испытаний приведены в табл. 1.

При малоцикловом растяжении эффективный коэффициент K_0 так же, как и коэффициент усталостной прочности $\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_H}$, в целом, слабо зависит от наличия концентратора (5—20%). Можно отметить, что на принятой базе испытания, в указанных выше пределах, наблюдается тенденция уменьшения влияния концентратора напряжений в образцах, ориентированных по основе и утку ткани (в последнем случае — в большей мере), а под углом 45° значение K_0 почти не меняется.

Циклическое деформирование образцов без отверстия (ориентации $\varphi = 45^\circ$) сопровождается развитием поврежденности по всему объему (при $\varphi = 0^\circ$ и 90° — визуально не наблюдается). Если в этом случае трудно

* Расчет уравнений проведен по неосредненным данным. Точками обозначены среднearифметические значения усталостной прочности и долговечности. Указаны также доверительные границы колебания среднего значения при вероятности 0,95, рассчитанные на основе распределения Стьюдента. Как на фиг. 1, 2, так и на последующих фигурах светлые точки соответствуют образцам с отверстием.

Таблица 1

№ п/п $\frac{\alpha}{\beta}$	Ориентация, град	Наличие концентра- тора	Предел прочности $\sigma_{в}$, кг/см^2	Коэфф. вариации $\sigma_{в}/\sigma_{в}$	Эфф. коэфф. конц. напр. K_{+1}	a	d	Коэфф. корреляции r_{max} $= a - d \lg N$	Коэфф. уст. прочности на базе	Эфф. коэфф. конц. напр. K_0 на базе
I. Малоциклоное растяжение										
1	0	-	52,80	4,20	-	54,2359	6,7204	-0,8931	0,65	-
2	0	+	36,45	2,10	1,45	35,4019	2,7801	-0,8468	0,74	1,26
3	45	-	20,85	18,50	-	24,3773	2,0773	-0,8743	0,87	-
4	45	+	15,40	3,05	1,36	16,0335	1,2104	-0,9599	0,81	1,38
5	90	-	37,40	2,20	-	34,7541	4,3516	-0,9359	0,58	-
6	50	+	20,80	3,65	1,80	22,2141	2,8345	-0,9497	0,69	1,52
II. Многоциклоное растяжение										
7	0	-	52,80	4,20	-	52,4818	6,7385	-0,8947	0,19	-
8	0	+	36,45	2,10	1,45	40,9224	5,3879	-0,8868	0,19	1,44
9	45	-	20,85	18,50	-	10,6056	0,7301	-0,9014	0,29	-
10	45	+	15,40	3,05	1,36	11,3412	0,8795	-0,9280	0,38	1,04
11	90	-	37,40	2,20	-	22,9152	2,3234	-0,8419	0,22	-
12	90	+	20,80	3,65	1,80	23,7704	3,2669	-0,8787	0,16	2,55

определить начальный очаг возникновения трещины, то при испытании образцов с отверстием первые трещины всегда возникают у границ концентратора. Основную роль в зарождении этих трещин, видимо, играют сдвиговые напряжения, в отношении которых, как известно, стеклопластики сопротивляются слабее.

Направление дальнейшего распространения трещины и макрохарактер трещинообразования зависят от ориентации образца. При $\varphi = 0^\circ$ и 45° визуально наблюдаются магистральные трещины, которые возникают параллельно волокнам. Когда сила действует по основе ткани, четко видны две такие трещины, развивающиеся по границе волокон основы по разные стороны отверстия в противоположных направлениях. При испытании образцов, вырезанных в диагональном направлении, выделяются четыре магистральные трещины, идущие симметрично направлению нагрузки.

Когда растяжение происходит в направлении утка ткани, характер процесса разрушения несколько меняется. В этом случае трещины, развиваясь от границ отверстия, в процессе усталости не вливаются в магистральные трещины, а образуют две ярко выраженные зоны повреждения, имеющие веерообразную форму. Вершины этих зон располагаются у края отверстия в точках, где концентрация напряжений по сечению достигает максимума.

В области многоциклового усталости (частота 1200 цикл/мин) рассмотренный концентратор при нагружении вдоль волокон основы ткани не вызывает изменения коэффициента усталостной прочности и эффективного коэффициента концентрации, равно как и не отражается на характере хрупкого разрушения материала. В случае циклического растяжения в диагональном направлении ($\varphi = 45^\circ$) коэффициент $K_0 \approx 1.0$, что свидетельствует о практически полном отсутствии влияния концентратора (табл. 1 и 2). Это, в частности, можно объяснить работой вязко-упругой матрицы в композиции волокно-связующее, когда по мере разрушения

Таблица 2

Ориентация φ град.	Наличие концентратора	Диапазон уровня относ. напряжения $\frac{\sigma_{max}}{\sigma_a}$	Диапазон долговечности N , $\times 10^6$ цикл	Критическая температура разогрева $T_k, ^\circ C$	Температура разогрева при разрушении $T_p, ^\circ C$
0	—	0.23—0.56	0.004—4.165	31.0 ± 3.0	34.5 ± 3.5
	+	0.24—0.41	0.040—1.780	27.5 ± 1.0	34.0 ± 4.0
45	—	0.31—0.41	0.050—0.925	37.5 ± 4.5	46.0 ± 5.0
	+	0.39—0.49	0.007—1.410	28.0 ± 2.5	35.0 ± 4.0
90	—	0.26—0.36	0.010—1.945	41.5 ± 5.0	45.5 ± 6.5
	+	0.22—0.48	0.015—0.370	31.0 ± 2.5	31.0 ± 2.5

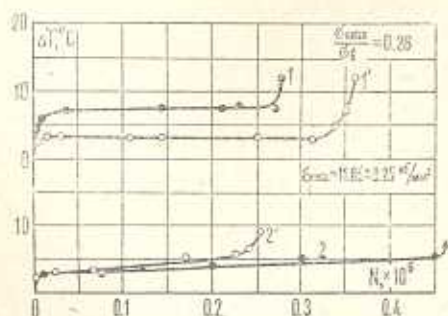
матрицы от напряжений сдвига уменьшается эффективная глубина зоны распространения влияния отверстия. Поэтому происходит снижение концентрации напряжений у границ отверстия [2]. В этом случае разрушение имеет объемный характер с сильно прогрессирующей по времени повреждаемостью. Последнее обстоятельство, характерное также и при де-

формировании образцов, вырезанных по утку, в эксперименте требует периодического доведения максимальной нагрузки и асимметрии цикла до первоначально заданных значений.

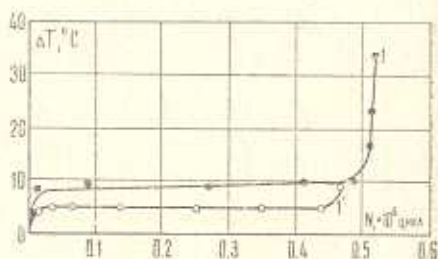
С точки зрения анизотропии влияние концентратора особенно проявляется при усталостном испытании образцов, ориентированных по утку ($\varphi = 90^\circ$). Прежде всего, в отличие от пяти других здесь рассмотренных и ранее наблюдававшихся случаев [3], имеет место резкая зависимость эффективного коэффициента K_0 от долговечности (изменение K_0 почти в два раза на принятой базе испытания). Как показывают подсчеты, при меньших долговечностях, то есть при высоких уровнях напряжения, концентрация напряжений сильно уменьшается (также и по сравнению с пределом прочности), а при низких напряжениях значение K_0 резко возрастает. Это можно объяснить тем, что с ростом нагрузки касательные напряжения раньше достигают предела сдвиговой прочности связующего, чем растягивающие напряжения достигнут предела прочности стеклопластика [2].

Боллером [6] подробно изучено влияние концентратора в виде круглого отверстия на усталостную прочность ряда стеклопластиков при симметричном растяжении-сжатии в условиях повышенных температур. Установлено, что в диапазоне $23-260^\circ\text{C}$ температура практически не влияет на чувствительность к концентрации напряжений, а в некоторых случаях значение коэффициента K_{-1} получается ниже на $15-20\%$ (в одном случае даже $K_{-1} = 0.83$).

В настоящей работе изучался циклический разогрев стеклотекстолита при многоцикловом растяжении в зависимости от анизотропии и наличия концентратора. Температура измерялась на поверхности образца в зоне разрушения (возможное отклонение не более $1-2$ мм) [7].



Фиг. 3. Влияние концентратора на разогрев, $\varphi = 0$



Фиг. 4. Влияние концентратора на разогрев $\varphi = 45^\circ$, $\sigma_{\max} = 6.60 \pm 0.10 \text{ кг/мм}^2$

На фиг. 3—5 приведены характерные кривые разогрева $\Delta T-N$. Графики показывают влияние концентратора на кинетику разогрева при одинаковом значении номинального напряжения σ_{\max} и относительном уровне напряжения $\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_n}$.

Экспериментальные данные указывают на то, что при одинаковом относительном уровне напряжения на линейном участке зависимости $\Delta T-N$, которым в основном определяется долговечность, у образцов с от-

вертием разогрев ΔT меньше, чем у гладких образцов, и независимо от угла φ составляет всего лишь около 5°C . При условии $\sigma_{\max} = \text{const}$ на отмеченном участке циклический разогрев, как правило, выше на образцах с концентратором напряжения.

При низких значениях напряжения рост температуры на основном участке долговечности практически отсутствует (примеры иллюстрируются на фиг. 3—5). Однако, и в этих случаях излому образца предшествует характерный подъем температуры разогрева. В табл. 2 приведены среднearифметические значения критической температуры разогрева T_k и температуры разрушения T_p , определенные с учетом температуры среды испытания [7]. Здесь показано также колебание температуры разогрева, соответствующее вероятности ошибки измерения 0,67. Как видно из табличных данных, величина температур T_k и T_p мало зависит от напряжения или долговечности.

При изменении напряжения почти в 1,5—2,5 раза (долговечности на 2—3 порядка) температура меняется на 20—30%. При этом несущественно также и влияние анизотропии.

На основании экспериментальных данных (табл. 2) можно заклю-

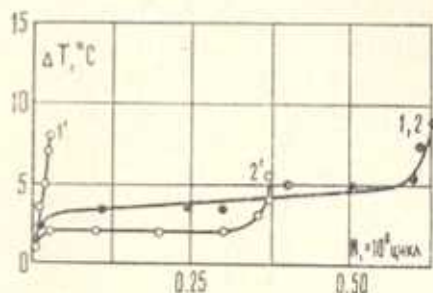
чить, что концентратор напряжения снижает характерные величины температуры разогрева (напр., для ΔT_k в 2—3 раза). Одной из причин ослабления разогрева может быть улучшение условий теплоотвода с поверхности образца при наличии концентратора.

Выводы. 1. Рассмотренный концентратор в виде центрального круглого отверстия в зависимости от ориентации растягивающей нагрузки и частоты нагружения по-разному влияет на концентрацию напряжений в стеклотекстолите:

а) при циклическом деформировании в направлении основы ткани ($\varphi = 0^\circ$) и под углом $\varphi = 45^\circ$ независимо от частоты концентрация напряжений ниже, чем для предела прочности; при $\varphi = 45^\circ$ в области многоциклового усталости концентрация напряжений практически отсутствует;

б) при малоцикловом растяжении стеклотекстолита вдоль утка ткани концентрация напряжений заметно ниже, чем для предела прочности, а в многоциклового области резко зависит от долговечности; при высоких уровнях напряжений она существенно ниже, а при низких напряжениях — выше, чем для предела прочности в этом направлении.

2. При одинаковом относительном уровне циклического напряжения образцы с концентратором имеют меньший разогрев, чем гладкие образцы; независимо от анизотропии материала на основном участке выносливости образцов разогрев в этих случаях практически отсутствует.



Фиг. 5. Влияние концентратора на разогрев, $\varphi = 50^\circ$; 1,1' — $\sigma_{\max} = 9,70 \pm$

$$\pm 0,10 \text{ кг/мм}^2; 2,2' - \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_k} = 0,250.$$

ԱՊԱԿԵՏԻՔԱՏՈՒՄԻ ԾԻԿԼԱՅԻՆ ԱՄՐՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ՏԱՔԱՑՄԱՆ
ԱՆԻՉՈՏՐՈՊԻԱՆ ԿՈՆՑԵՆՏՐԱՏՈՐԻ ԱԹԿԱՏՈՒԹՅԱՆ ԳԵՊԷՈՒՄ

Ա մ փ ո փ ո ՝ մ

Կատարված է կտր անցքի ձևով կոնցենտրատորի ազդեցության փորձ-նական ուսումնասիրությունը ապակեհատերատուիտի հոգնածային աճրոթյան անիզոտրոպիայի վրա փոքրաթիվ ցիկլային (հաճախականությունը 1 ցիկլ/րոպե) և բազմացիկլային (1200 ցիկլ/րոպե) ճզման զեպրում: Գրատարված է նաև կոնցենտրատորի ազդեցությունը նյութի ինքնատարացման և մակրո-րաչքայման երևույթի վրա՝ բևի կողմնորոշումից կախված, որը կիրառվել է զործվածքի հենքի և թեզանի երկայնությունը և անկյունագծային ուղղու-թյամբ:

ANISOTROPY OF CYCLE STRENGTH AND HEATING OF
GLASS REINFORCED PLASTIC WITH A CONCENTRATOR

N. E. SARKISIAN

S u m m a r y

An experimental study of the effect of a tension concentrator in the form of round aperture on anisotropy of glass reinforced plastic's strength under strain in the region of low-cycle (loading frequency of one cycle per minute) and multy-cycle (1200 cycles per minute) fatigue is discussed.

The effect of the concentrator on the heating change and on the mode of macrodistraction of the material, depending on the orientation of loading, applied at the angles of 0° , 45° and 90° , is considered as well.

ЛИТЕРАТУРА

1. Серенсен С. В., Стреляев В. С., Болотников Б. И. Определение расчетных характеристик прочности стеклопластиков в зонах концентрации напряжений. Проблемы прочности, 1972, № 10, 3—9.
2. Подилов А. Н., Степанов Е. И. Влияние концентрации напряжений на прочность ортогонально армированных полимеров. Машиноведение, 1975, № 1, 70—74.
3. Boller K. H. Resume of fatigue Characteristics of Reinforced Plastic Laminates Subjected to Axial Loading. In Fatigue an interdisciplinary approach Proceedings of the 10-th Sagamore Army Materials Research Conference, 1964, 325—341.
4. Owen M. J., Bishop P. T. Fatigue properties of glassreinforced plastics containing a stress concentrator. „J. Phys., D., Appl. Phys., 1973, 6, No. 17, 2057—2069.
5. Корган Х. Т. Разрушение армированных пластиков. М., Химия, 1967, 165 с.
6. Хайбул Р. Б. Проектирование с учетом усталости. М., Машиностроение, 1969, 504 с.
7. Саркисян Н. Е. Влияние анизотропии на циклическую деформативность и разогрев стеклопластиков типа СВАН. Механика полимеров, 1971, № 5, 898—903.