

Н. Е. САРКИСЯН, М. М. МАРТИРОСЯН

## ВЫНОСЛИВОСТЬ ОРТОГОНАЛЬНО АРМИРОВАННЫХ СТЕКЛОШПОНОВ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ ПЕРЕГИБЕ

Исследование выносливости тонкой ленты из конструкционных материалов в условиях нагружения, соответствующих циклическому перегибу, представляет определенный практический интерес [1,2].

В настоящей работе проведено экспериментальное исследование деформационной выносливости стеклошпонов типа СВМ при циклическом перегибе в зависимости от анизотропии механических свойств и типа связующего материала, частоты перегиба и степени предварительного натяжения образца.

### 1. Методика испытаний

В качестве материала для испытаний были использованы стеклошпоны на эпокси-фенольном и бутвар-фенольном связующем с соотношением волокон в ортогональных направлениях 1:1. Число слоев шпона было 18 (по 9 в двух ортогональных направлениях). Фактическое соотношение волокон колебалось в пределах от 1:1.5 до 1:1.3. Диаметр стекловолокна  $13.1 \div 13.8$  микрон, содержание смолы в шпоне  $22.0 \div 24.6\%$ .

Образцы для испытаний имели форму прямоугольной полоски размером  $150 \times 10 \times \delta$  мм, где  $\delta$  — толщина шпона. Толщина  $\delta$  колебалась в пределах от 0.162 до 0.317 мм в зависимости от листа и типа связующего.

Для исследования влияния анизотропии образцы вырезались в трех направлениях в плоскости листа, которые с направлением волокон составляли угол  $\varphi = 0^\circ, 22.5^\circ$  и  $45^\circ$ .

Деформативные и прочностные свойства стеклошпонов при простом растяжении (табл. 1) определялись по данным испытания 5 образцов в обычных условиях среды на разрывной машине ЦДМ-500 при постоянной скорости перемещения захватов  $v = 10$  мм/мин. Деформации при растяжении определялись проволочными тензодатчиками сопротивления с помощью электронного измерителя деформации АИД-1М.

Как показали сравнительные испытания, по своим механическим свойствам стеклошпон мало отличается от листового материала. Так, например, прочность шпона на растяжение на  $2 \div 7\%$  выше прочности листа толщиной 5 мм, спрессованного из тех же шпонов методом горячего прессования.

Усталостные испытания проводились при режимах так называемого жесткого нагружения, когда в процессе испытания постоянным сохраняется амплитудное значение угла перегиба. При этом в процессе

циклического деформирования для разупрочняющегося материала может произойти уменьшение прилагаемого изгибающего момента.

Таблица 1

Механические свойства стеклошпонов при статическом растяжении

Тип связующего	Угол с направлением волокон $\varphi$ , град	Механические характеристики		Результаты статистической обработки данных по пределу прочности $\sigma_{\text{п}}$	
		предел прочности $\sigma_{\text{п}}$ , кгс/мм <sup>2</sup>	модуль упругости $E$ , кгс/мм <sup>2</sup>	среднее квадратическое отклонение, кгс/мм <sup>2</sup>	коэффициент вариации, %
Эпоксифенольное	0	64.40	2480	2.03	3.15
	22.5	15.04	1060*	0.85	5.65
	45	12.80	785*	1.69	13.15
Бутварфенольное	0	41.12	2350	2.71	6.61
	22.5	11.76	1300*	1.56	13.23
	45	7.10	1080*	0.14	1.80

\* По начальному линейному участку зависимости напряжение-деформация.

Испытания проводились на приборе ДП-5/3 (фиг. 1), служащем для определения выносливости гибких листовых образцов из пластмасс, металлической фольги и т. д. в условиях перегиба.

Образец закреплялся в зажиме, выполняющем попеременно вращательное движение в противоположные стороны вокруг горизонтальной оси, совпадающей с осью перегиба. Висящий вниз свободный конец образца нагружался грузами, придающими образцу предварительное натяжение.

Угол перегиба образца (угол поворота зажима) в опытах варьировался в пределах до 90° и установился с точностью 1°.

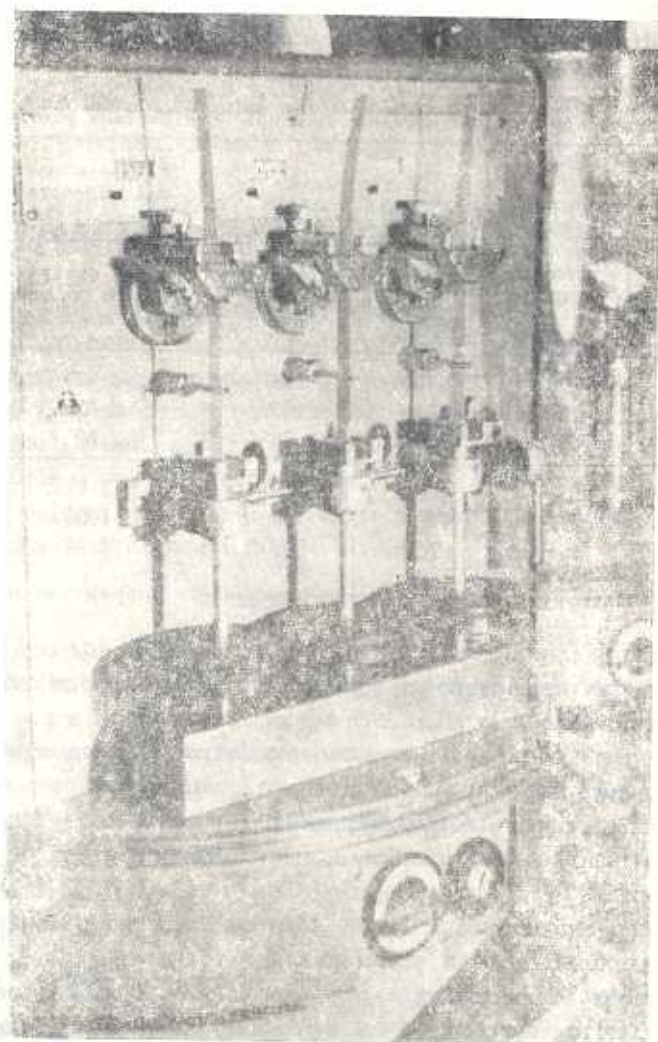
Испытания проводились при частоте 95 и 285 *цикл/мин*. Эти значения являются промежуточными между частотами, характерными для мало- и многоциклового усталости стеклопластиков. Последние же, в основном, определяются соответственно на базе 10<sup>4</sup> и 10<sup>6</sup> циклов нагружения. С учетом этого база испытаний в данной работе ограничена 10<sup>5</sup> циклами.

В процессе экспериментов исключались остановки и другие перемены, могущие влиять на результаты испытаний.

Для каждой серии испытаний отношение величины постоянной растягивающей нагрузки  $P$  к величине нагрузки  $P_{\text{ст}}$ , разрушающей образец при статическом растяжении\*, оставалось постоянным и составляло

$$K = \frac{P}{P_{\text{ст}}} = 0.024, 0.029 \text{ и } 0.122$$

\* Это отношение в дальнейшем будет упоминаться как коэффициент (степень) предварительного натяжения образца.



Фиг. 1. Общий вид установки для испытания материалов на циклический симметричный перегиб.

При этом, как показывают расчеты, напряженное состояние материала в образцах, продольная ось которых совпадает с направлением стекловолокон в шпоне, характеризуется коэффициентом асимметрии цикла, равном 0,96 и 0,98, соответственно, для шпонов на эпокси- и бутвар-фенольном связующем.

Установка обеспечивала одновременное испытание трех образцов при одинаковом угле перегиба  $\theta$  и коэффициенте предварительного натяжения  $K$ .

Количество образцов, испытанных на одной точке (при заданном угле перегиба  $\theta$ ), определялось степенью разброса экспериментальных данных и составляло 3—8.

В целом для данной работы было испытано 230 образцов.

Испытания проводились в закрытой камере в нормальных условиях температуры и влажности.

Повышение температуры материала в рабочем сечении образца в процессе циклического деформирования обнаружено не было. В процессе усталостных испытаний определялось число циклов  $N$  до разрушения образца в зависимости от амплитудного значения задаваемого угла перегиба  $\theta$  и степени предварительного натяжения  $K$ .

Статистическая обработка экспериментальных результатов производилась по методике малого числа измерений [3].

## 2. Обсуждение результатов испытаний

Зависимость между числом циклов до разрушения и амплитудным значением угла перегиба  $\theta$  для фиксированной ориентации  $\varphi$  и предварительного натяжения в полулогарифмической системе координат оказывается линейной (фиг. 2—5).

Кривые Велера для исследованных стеклошпонов, независимо от типа связующего, частоты перегиба и угла между направлением армирующих волокон и плоскостью перегиба, описываются уравнением

$$\theta = a - b \lg N$$

где  $a$  и  $b$  — параметры, определяемые из опыта, зависящие от указанных выше факторов.

В табл. 2 помещены значения параметров  $a$  и  $b$  для всех 11 серий испытаний.

На приведенных в статье усталостных диаграммах точки соответствуют среднеарифметическим значениям  $\theta$  и  $N$ , а графики построены по корреляционным уравнениям, вычисленным на основе неосредненных результатов каждой серии испытаний. В табл. 2 помещены коэф-

Таблица 2

Корреляционные уравнения зависимости  $\theta - \lg N$

Тип связующего стеклошпонона	Угол вырезки образца с направ. волокон $\varphi$ , град	Коэффициент степени предварительного натяжения, $K$	Частота перегиба, $\omega$ , цикл/мин	Параметры корреляционного уравн. $\theta = a - b \lg N$		
				$a$	$b$	$r$
Эпоксифенольное	0	0,024	95	65,607	8,547	-0,960
	0	0,029	95	58,701	7,463	-0,999
	22,5	0,029	95	103,101	13,423	-0,999
	45	0,024	95	128,072	15,552	-0,999
	45	0,029	95	126,313	16,313	-0,955
	45	0,122	95	86,864	10,050	-0,997
	45	0,122	285	93,804	10,866	-0,997
Бутакарфенольное	0	0,024	95	73,083	8,834	-0,987
	0	0,029	95	69,632	8,772	-0,995
	22,5	0,029	95	108,052	13,072	-0,986
	45	0,029	95	117,738	11,655	-0,992

коэффициенты корреляции  $r$  зависимости между  $\theta$  и  $\lg N$ . Отношение критерия линейности к его основной ошибке колебалось от 0.125 до 0.795, что свидетельствует о существенной линейности зависимости Велера.

Линейность зависимости  $f - \lg N$  и  $\sigma - \lg N$  ( $f$  и  $\sigma$  — соответственно, прогиб и максимальное напряжение в рабочем сечении образца) для листового СВМ-а и большого числа стеклотекстолитов установлен как в испытаниях на жесткий [4, 5], так и на мягкий режим плоского изгиба [6]. Кривые Велера состоят из двух линейных участков. Точка перелома графика, характеризующая в этих опытах предел выносливости материала, соответствует  $10^4 - 10^6$  циклам нагружения. Исключение составляет случай изгиба образцов, вырезанных в направлении волокон, при котором предел выносливости не наблюдается даже на базе  $10^7$  циклов [4, 5].

Рассматриваемые здесь испытания, подтверждая линейный характер усталостной зависимости  $\theta - \lg N$ , вместе с тем указывают на отсутствие предела выносливости стеклопластиков при циклическом перегибе на базе  $10^8$  циклов независимо от угла между направлением волокон и плоскостью деформирования.

Анизотропия прочностных и деформативных свойств исследованных стеклошпонов влияет на выносливость лишь с количественной стороны.

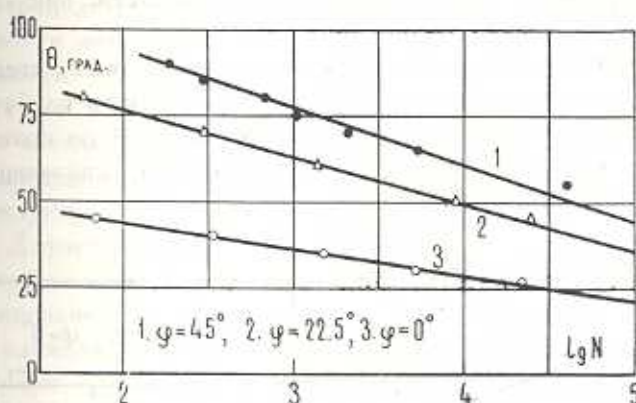
Кривые, представленные на фиг. 2, выражают число циклов симметричного перегиба до разрушения в зависимости от анизотропии материала и значения угла перегиба  $\theta$  (при постоянном коэффициенте степени предварительного натяжения). Эти кривые свидетельствуют об относительно большей выносливости материала по мере приближения угла между направлением стекловолокон и плоскостью циклического перегиба к углу наименьшей жесткости материала\*. Например, при  $N_p = 10^4$  циклов угол перегиба  $\theta$  для образцов ориентации  $\varphi \neq 0^\circ$  примерно в два раза больше, чем угол перегиба образцов, вырезанных вдоль волокон. Однако, следует также иметь в виду, что с увеличением числа циклов до разрушения разница в значениях угла перегиба несколько уменьшается.

Независимо от долговечности излом образца происходит внезапно в течение полуцикла перегиба. Однако, следы начала макроразрушения, начинающегося сначала в смоле, наблюдаются задолго до излома образца.

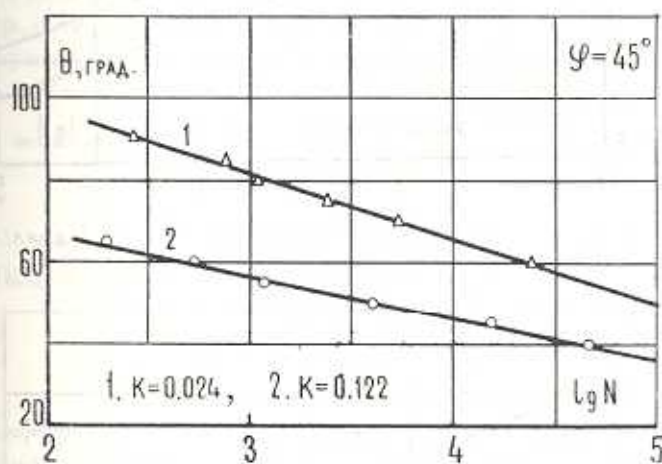
Влияние величины коэффициента предварительного натяжения образца на его выносливость было исследовано при испытаниях образцов всех трех ориентаций на стеклошполах с эпокси-фенольным и бутадиен-фенольным связующим.

На фиг. 3, для иллюстрации, приведены усталостные диаграммы испытания образцов, вырезанных при  $\varphi = 45^\circ$ .

\* Угол наименьшей жесткости зависит от соотношения волокон. В частности, для ортогонально равнопрочного стеклошпона этот угол равен  $45^\circ$ .



Фиг. 2. Влияние анизотропии свойства стеклошпона на деформационную выносливость при циклическом перегибе. (Связующее — эпокси-фенольное,  $K = 0.022$ , частота перегиба — 95 цикл/мин).



Фиг. 3. Влияние предварительного натяжения (связующее — эпокси-фенольное, частота перегиба — 95 цикл/мин).

Как видно из сравнения значений параметров  $\alpha$  в табл. 2 и графиков на фиг. 3, для образцов, одинаково ориентированных относительно направления волокон, изменение коэффициента предварительного натяжения в небольшом интервале ( $\pm 20\%$  от некоторого среднего значения) мало влияет на величину угла перегиба  $\theta$  и приводит к некоторому почти поступательному перемещению отрезка прямой  $\theta - \lg N$  на плоскости координат. Более сильное изменение коэффициента  $K$  существенно изменяет наклон усталостной диаграммы. Например, увеличение коэффициента предварительного натяжения в 4 раза вызывает уменьшение угла перегиба  $\theta$  от  $28$  до  $16^\circ$  (на базе числа циклов разрушения от  $10^2$  до  $10^5$  циклов).

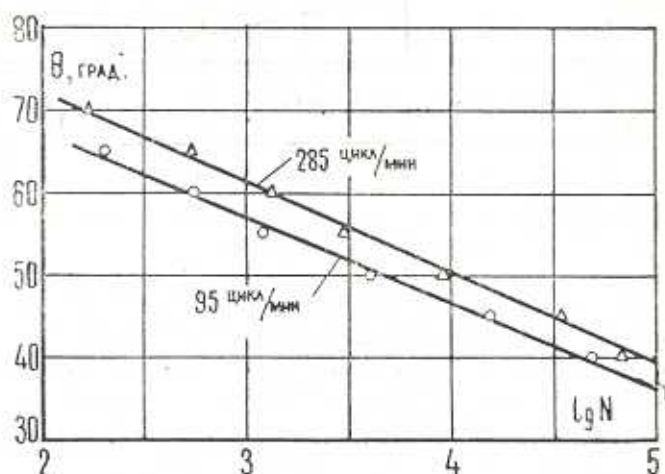
Влияние типа связующего на способность стеклошпонов сопротивля-

латься циклическому перегибу было выявлено в испытаниях образцов полосок, по-разному ориентированных в плоскости, при двух значениях коэффициента  $K$  (табл. 2).

Установлено, что, если соблюдается одинаковая степень предельного натяжения, выносливость стеклошпонов на бутвар-фенольном связующем оказывается существенно большей по сравнению с выносливостью стеклошпонов на эпокси-фенольном связующем. В частности, это видно из фиг. 4.



Фиг. 4. Влияние типа связующего (частота перегиба — 95 цикл/мин).



Фиг. 5. Влияние частоты перегиба.

На фиг. 5 приведены графики зависимости Велера, иллюстрирующие влияние частоты циклического перегиба на выносливость образцов стеклошпона на эпокси-фенольном связующем, вырезанных в диагональном направлении ( $K=0.122$ ). Как следует также из табл. 2, уве-

личение частоты перегиба в 3 раза практически не изменило характера усталостной диаграммы, но привело к некоторому повышению сопротивляемости материала.

**Выводы.** 1. Установлены линейный характер зависимости  $\bar{N} - \lg N$  и отсутствие „истинного“ предела выносливости ортогонально равнопрочных стеклошпонов СВМ при циклических перегибах на базе  $10^5$  циклов независимо от угла вырезки образца с направлением волокон, типа связующего и частоты перегиба.

2. Деформационная выносливость стеклошпонов увеличивается по мере приближения угла между направлением волокон и плоскостью деформирования к углу наименьшей жесткости материала (при относительно одинаковой степени предварительного натяжения образца).

3. При одинаковых условиях циклического перегиба стеклошпоны на бутвар-фенольном связующем обладают относительно большей деформационной выносливостью, чем стеклошпоны на эпокси-фенольном связующем.

4. Увеличение частоты перегиба в 3 раза практически не меняет характер усталостной диаграммы, но приводит к некоторому повышению сопротивляемости материала деформации симметричного циклического перегиба.

Институт механики АН Армянской ССР

Поступила 10 XI 1974

Ն. Բ. ՍԱՐԳՍՅԱՆ, Մ. Մ. ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ

ՓՐՔՈԳՆՈՆԱԿԱՆ ԱՐՄԱՆԱՎՈՐՎԱԾ ԱՊԱԿԵՇՊՈՆՆԵՐԻ ԳԻՄԱԿՐՈՂԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆԸ  
ՑԻԿԼԻԿ ԾՌՄԱՆԸ

Ա մ փ ո փ ո ս մ

Քննարկվում են СВМ տիպի ապակեշպոնների դիմադրողականության փորձնական ուսումնասիրության արդյունքները ցիկլիկ ծուման դեպքում կախժավ նյութի մեխանիկական հատկությունների անիզոտրոպիայից, խեժի տիպից, ծուման հաճախականությունից և նմուշների նախնական ձգման աստիճանից:

Փորձերի համար օգտագործվել են էպօքսի-ֆեննոլային և բուտվար-ֆեննոլային խեժերի վրա պատրաստված ապակեշպոններ: Նմուշների երկայնական առանցքները թելիկների ուղղության հետ կազմել են  $0^\circ$ ,  $22.5^\circ$  և  $45^\circ$  անկյունները: Հոգնածության ուսումնասիրության փորձարկումները կատարվել են կոշտ բեռնավորման ուժի պայմաններում, 95 և 285 ցիկլ-բոլսե հաճախականությամբ: Նմուշի ծուման անկյունը փորձերի ընթացքում փոփոխվել է  $27^\circ$ -ից մինչև  $90^\circ$ :



RESISTANCE OF ORTHOGONAL REINFORCED LAMINATED  
GLASS-FIBRE SHEETS TO CYCLIC TWISTING

N. S. SARKISIAN, M. M. MARTIROSIAN

## S u m m a r y

The experimental results of investigation on resistance of laminated glass-fibre sheets of the CBAM type to cyclic twisting, depending on anisotropy of mechanical properties and the type of the bending material, twisting frequency and the degree of preliminary tension, are presented.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Ван-Гаут Ю. Н. Стойкость к усталостному разрушению полихлорвиниловых пластиков. Механика полимеров, №3, 1965.
2. Зыкин П. Г., Лукин Б. Ю. Выносливость тонкой ленты из жаропрочных сплавов. Проблемы прочности, №2, 1974.
3. Митропольский А. К. Техника статистических вычислений. Физматгиз, М., 1961.
4. Ашкенази Е. К. Анизотропия механических свойств некоторых стеклопластиков. АДНТП, Л., 1961.
5. Ашкенази Е. К., Поздняков А. А. Испытание стеклопластиков на усталость. Заводская лаборатория, т. XXVII, №10, 1961.
6. Сидоренков А. Н., Захаров В. Н., Смирнов В. И. Усталостная прочность судостроительных стеклопластиков при знакопеременном изгибе и влияние на нее некоторых технологических и эксплуатационных факторов. В сб.: „Свойства полиэфирных стеклопластиков и методы их контроля“, Л., вып. 2, 1970.