## 

Մեխոսնիկա

XXII, No 6, 1969

Механнка

#### Н Е САРКИСЯН

# ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМАТИВНОСТЬ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ ТИПА СВАМ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ ОСЕВОМ НАГРУЖЕНИИ

В настоящей работе излагаются результаты исследования проностных и деформативных свойсти СВАМ-он при осевом циклическое нагружении в зависимости от анизотропни механических свойств материяла. Рассматривается влияние укладки волокон на усталоствую прочность стеклопластика.

Исследонанию усталостной прочности стеклопластиков СВАМ при симметричном цикле плоского изгиба посвящены работы [1, 2]. В атих работах осуществлялся режим "жесткого" нагружения, при котором и процессе испытаний сохраняется постоянным амплитулюе значение прогиба образца.

Настоящие усталостные испытания проводились в режиме "мягкс го" нагружения (нагрузка *P*. const). Как известно, при усталостие испытаниях стеклопластиков целесообразным считается применени "мягкого" режима нагружения, т. к. помимо прочего (отсутствие релаксации напряжений и т. д.) оно дает простой способ непосредственного расчета напряжения в образце. "Жеаткий" же режим пагружения для определения напряжений требует пересчета величины деформаций на напряжения с использованием для этого неизвестного значения циклического (динамического) модуля упругости.

1. Методика экспериментов.

Материалами для исследования служили стеклопластики типв СВАМ, изготовленные на ленинградском заводе слоистых пластико

СВАМ на эпокси- енольном связующем имел укладку волоко 1:1 и 5:1. Продольная ось образцов сонпадала с направлением нолоков СВАМ на бутвар-фенольном связующем имел равнопрочную уклади стеклошпонов 1:1 и оряентацию образцов – 0,  $\gamma = 22.5^{\circ}$  и  $\gamma = 45^{\circ}$ .

Образцы для испытаний вырезались на фрезерном станке с применением охлаждения. Форма и размеры образцов принедены на фиг. 1.

Обрязцы на эпокси-фенольном свялующем имели толщину 5 ил и испытывались на пульсирующее растяжение (коэффициент асимметрицикла r = 0). Толщина СВАМ-а на связующем БФ-4 составляли 10 мм. Эти образцы поднергались симметричному циклу растяжения сжатия (r = 1). Механические характеристики образцов в случае статического растяжения определялись на разрывной машине ЦДМ-10 при скорости холостого перемещения захватов v = 6 мм мин. Результаты иснытавия приведены в табл. 1, где значения деформативных свойств совтветствуют начальному линейному участку зависимости напряжение деформация.



Фиг. 1. Форма и размеры образца.

Все статические и усталостные испытания проводились при темвературе окружающей среды 22 2 С и влажности 67 5°.

- TT-	P 1	٢.
- C + 1	5 1 1 1 1 1 1	
- C 11	VANGE F	

Механические свойство стеклопластиков СВАМ при статическом ристижении

Тяп связующего	Уклидиа подокон	Угол нырел- ки оброзца 7. грид	Предел прочности <sup>1</sup> 2. кгс мм <sup>2</sup>	Ковффи- цисит нариа- ции вели- чины <sup>з</sup> в. <sup>0</sup> о	Модуль упруго- сти Е, ис ми-	Относитель- ное удлине- ине при раз- рыяс о
Заался-фенольное	5:1	0	64.09	6.32	4810	1.32
Заокся-фенольное	1:1	0	43.12	7.52	2969	1.78
Бутнар-фонольнос	1:1	0	35.80	2.86	2480	1.56
Бутар-фенольное	1:1	22.5	13.98	7.07	1170	4.60
Бутыр-фенольное	1:1	45	8.77	6,51	1040	-

Усталостные испытания проводились на гидропульсаторе ЦДМ-10 Пу. Частота нагружений равнялась 1200 дикл лим и пыдержиналась с точностью до 1%. База испытаний была принята равной 10° циклам. Зъдаваемая нагрузка и коэффициент асимметрии пикла г устанавливались по шлейфовому осциллографу МПО2 и выдерживались ручной регулировкой с точностью ± 3%. Проволочные датчики сопротивлевия были наклеены на хвостовую часть корпуса промежуточных захштов. Конструкция этих захватов описана в работе [3].

Продольная деформация измерялась при помощи специального устройства, состоящего из двух балочек, одна из которых двумя консольными упругими пластинками свободно опиралась на винты-упоры, лестко связанные с другой балочкой. Такое устройство при помощи шаблона устананливалось на образец с базой измерения 30 мм. Тензидатчики, наклеенные на упругие элементы измерителя деформаций, включались в мостовую схему, которая предварительно уравновешивалась перед началом испытания. Возникающее в процессе пульсаций изменение электрического сигнала после соответствующего усиления выдавалось на шлейфовый осциллограф H102. В процессе опытов деформации либо записывались на фотопленку, либо их значение определялось по длине луча на акране осциллографа. При испытании данных образцов 1 мм на экране осциллогрифов соответствовал напряжению 0.03-0.30 кгс/мем<sup>-</sup> и деформации 7 10 14 10 в зависимости от степени усиления первичнога электрического сигнала.

Во всех испытаниях с помощью трех медно-константановых термонар определялась температура саморазогрева материала на поверности образца. Имеющиеся данные по саморазогреву будут опубляконаны дополнительно.

Моментом разрушения материала принималось наступление такого состояния, при котором образец далее не выдержинал заданной нагрузки и асимметрии цикла. На каждую экспериментальную точку испытыпалось 3—4 образца. Всего для данного исследования было испытано 130 образцов.

Результаты экспериментов подвергались статистической обработке. Корреляционные уравнения усталостных диаграмм определялись по методикс [4], предложенной для случая малого числа испытания.

2. Обсуждение результатов испытании СВАМ-а на эпоксифенольном связующем.

Зависимость напряжение деформация в случае статического растяжения приведена на фиг. 2-а.



Фиг. 2. Зависимость напряжение - деформация при статическом растижени с.—(ВАМ по эпокси-фенольном связующем, . U. 1. укладка волокон 5:1.2-укладка волокон 1:1.6 — СВАМ из БФ-4, укладка волокон 1:1.1— 2 = 0.2 22.5. 3— 9 45.

Для интериала с укладкой нолокон 1:1 довольно четко обнаруживаются две точки перегиба, положение которых определяется соотнетственно напряжениями 0.26: и 0.73: и деформациями 0.34% и

56

1.20%. Модули упругости второго и третьего участкой соотнетственно составляют 80% и 67 от значения Е для начального линейного участка.

Указанные точки перегиба, на которых происходит скачкообразное унсличение попреждаемости, являются "порогами" трещинообразощния. Первый порог возникает, когда прилагаемым напряжением достигнется предельное состояние в точках, находящихся в наиболее ппряжениом состоянии (конценые участки нолокон, инородные включени и другие источники местной концентрации напряжений). По достидении яерхнего порога ускоряется процесс образования и разнития трещия, нарушается соиместность работы стеклонолоком и полимерчого связующего.

Пороги трещинообразования и явном пиле не обнаружинались при статическом рястяжении стеклопластика, именшего укладку нолокон 5.1. Это объясняется, по-видимому, тем, что паличие сравнительно теньшего числа смежных слоен с извимно перпендикулярным распололением нолокон имамиает сравнительно меньшие концентрации напряления и растрескинание полимерного связукицего [5].

Существует непосредственная снязь между деформацией порога трецилообразования при статическом растяжении и разрушением стекавпластика при пульсирующем растяжении.

Рассматринаемые усталостные испытания показынают, что начало прушения стеклопластика CBAM на эпокси-фенольном связующем конадает с моментом времени, когда деформации достигают опредеменного значения, не зависящего от величины циклического напряжеия и долговечности. Для образцов, имеющих укладку волокон 1:1, ота ракна 1.20 %, что соответствует деформации верхнего порога принообразования при статическом растяжении. При этом коэфищиент вариации величины средней деформации см. предшествующей разрушению, равен 4.2 "Для СВАМ 5:1 средние значения соотистененно составляют см. 0.98 %, и с ± 6.05 %. Отметим, что упазанная ныше снязь между характерными леформациями была ранее устаповлена в работе [6] при испытаниях на осеное нагружение ткаистых стеклопласунков ЭФС и ВФТ-С.

При циклическом пагружении образцы разрушаются хрупко в влоскости, перпендикулярной к оси нагружения. Между тем, разрушеим при статическом растяжении происходит с расслоением слоен, что всобенно наблюдается на образцах из СВАМ 1:1.

На фиг. З принедены записимости неличии мгноненной деформапри максимальном напряжении цикла от логарифма числя риклов.

Возможно, что фиг. З создает впечатление наличия зависимости жаду конечным значением деформации : перед разрушением и долчно нов. Однако, на самом деле это не так. На фиг. З приведена ишпь часть экспериментальных криных, а средняя неличина деформа-

57

ции - р определена как средняя из всех опытных данных (для СВАН 5:1 17 экспериментальных точек, а для СВАМ 1:1 11 точек). брос средней деформации также вычислен на основе всех набли дений. Полученная небольшая изменчивость среднен величины дае нам возможность считать, что деформация, при достижения которов наступает разрушение, не зависит от циклического напряжения и док говечности (в случае пульсирующего растяжения вдоль напраялен наибольшего количества волокой).



Фиг. 3. Зависимость таки – IgN для СВАМ на эпокси-фенольном связующи 0, 1 0. а. – уклядка половон 5:1, 1 так. – 34.1 кгс. м.м., 1° така 31.8 кгс. як 3 така 25.8 кгс. м.м.<sup>2</sup>, 4 таках – 24.0 кгс. м.м.<sup>2</sup>; 6 укладка волокон 1:1, 1 так. – 28.1 кгс. м.м.<sup>2</sup>, 2 така 22.6 кгс. м.м.<sup>2</sup>, 3 21.1 кгс. м.м.<sup>2</sup>, 4 така 18.4 кгс. им.

При пульсирующем растяжении среднее напряжение цикла и равно нулю. Поэтому позникает еще отличная от нуля деформена - min, которая прогрессирует но времени вследствие циклического ра упрочнения и виброполаучести материала. Величина деформации зависит от среднего напряжения цикла и продолжительности циклического кого нагружения.

Усталостные зависимости з<sub>стах</sub> IgA (.Х число циклов до ры рушения) лучше всего апроксимируются двуми линейными корреляцион ными уравнениями (фиг. 4, а). Первые участки дизграмм характеры ются коэффициентами корреляции 0.956, а вторые 0.997.

.

Козффициент усталостной прочности (отношение усталостной щости к прочности при статическом растяжении) для материала с цакой стекловолокон 5:1 несколько ниже, чем при укладке 1:1 и базе 10<sup>4</sup> циклон нагружения состанляет соотнетственно 33.8 % и



Фил. 4. Устаностные дилграммы стевлопластиков типа СВАМ. и — на эпоксивнои связующем. с 0. г 0. 1 укладка волоков 5:1, 2 укладка волоков hl: 6 ил связующем БФ-4, укладка волоков 1:1, г 1, 1 7 0, 2 7 22.5, с 45:

Низкий коэффициент усталостной прочности CBAM 5:1 следует обязенить более сильным саморазогреном материала, имеющим место ври срапнительно одинаконом уровне напряжения. Например, при напря акии, составляющем 40% от предела прочности материала, разность технаратур саморазогрена к 50 тыс. циклам нагружения достигает толо 40 С. 3. Обсужление результатов испытании СВАМ-а 1:1 на бутвар-фенольном связующем.

Зависимость z = z при статическом растяжении в случае действия силы идоль волокон (z = 0) в явном виде имеет одну точку перегиба (фиг. 2, 6). Точке перегиба (порогу трещинообразования) соответствует напряжение  $z = 29.2 \kappa i c \ mm^2$  или  $0.82 z_{\pi}$  при  $z = 1.18 \frac{0}{0}$ . Модуль упругости материала за порогом трещинообразования на  $25 \frac{0}{0}$  меньше по сравнению с начальным.

При циклическом пагружении параллельно стекловолокнам материал разрушается хрупко, без расслоения.

Когда растягивающая сила составляет с волокнами угол у 22.51 и у 45, образцы разрушаются с образованием значительной шейки, на которой возникает "бочка" с сильно развитой трещиноватостью. При этом изломы оказывлются зубчатыми и совпадающими с направлением волокон.

Зависимость долговечности от амплитудного значения напряжения в полулогарифмической системе координат линейна и состоит из двух участков независимо от анизотропии механических свойсти материала (фиг. 4, 6). Как это видно из графика, в случае симметричного растяжения – сжатия в диагональчом по отношению к полокнам направлении (z = 45) при  $N > 10^4$  циклах практически достигается истинный предел выносливости материала.

Коэффициент усталостной прочности (отношение - 1 СВАМ-ов на базе 10<sup>6</sup> циклов при = 0 и = 22.5 примерно одинаков (около 9%) и ниже, чем при = 45 (11%) ог предела прочности при статическом растяжении). Однако, это различие зависит от долговечности. При меньших долговечностях ( $N < 2.10^4$  циклов) коэффициент усталостной прочности практически совпадает в случаях нагружения под углом = 22.5 и = 45. Между тем, в случае симметричного растяжения сжатия вдоль волокон (2 = 0) отношение = 1/24 в указанном диапазоне долговечностей оказывается больше.

Анизотропия механических свойств стеклопластиков типа СВАМ при кратковременных испытаниях изучена достаточно хорошо. Однако имеется мало данных о влиянии анизотропии на усталостную прочность. Насколько нам изпестно, этот вопрос рассматринался лишь в работе [1], где исследовалась усталостная прочность материала при изгибе в плоскости, параллельной волокнам, и в плоскости, составляющей с ними угол z 45.

Результаты настоящего исследования указывают на нозможность применения изисстного тепзорного соотношения [7] для определения усталостной прочности и любом направлении по отношению к волокнам на основании экспериментально полученных величин усталостной прочности : , 2<sup>90</sup> и 2<sup>47</sup> 1. Формула для определения усталостной прочности имеет вид

$$z_{-1} = \frac{z_{-1}}{\cos^4 z + b \sin^2 2 z + c \sin^4 z}$$
(1)

где

$$b = \frac{\sigma_{-1}^0}{\sigma_{-1}} - \frac{c+1}{4}, \quad c = \frac{\sigma_{-1}^0}{\sigma_{-1}^0}$$

Усталостная прочность материала в направлении  $\Rightarrow 22.5^\circ$ , определенная по формуле (1), совпадает с фактической тем лучше, чем меньше долговечность. Расхождение по базе 10<sup>4</sup> циклов и среднем состанляет 12<sup>0</sup>/<sub>0</sub>. Отметим, что в случае оценки кратковременной прочности погрешность составила всего 0.9<sup>0</sup>/<sub>0</sub>.

Данные, принеденные в табл. 2, показывают влияние долговечности на степень анизотропии усталостной прочности CBAM-а. Последнюю определяем как отношение усталостной прочности при данном, по отношению к волокнам, угле нагружения (=\_1) к соответствующему значению при == 0

$$r = \frac{r_{-1}}{r_{-1}^0}$$
 (2)

Таблица 2

Зависямость степени анизотронии усталостиой прочности (2 - - - - )от долговечности

Утол	вырез-	Статическое	Долговечность, циклы				
XN,	1pag	растяжение	5-102	8-102	2-104	105	104
	0	1.000	1.000	1.000	1 000	1.000	1,000
	22.5 45'	0.392	0.320	0.320	0.352	0.368 0.260	0.370

Аналия результатов показывает, что по сравнению с анизотропией кратковременной прочности степень анизотропии усталостной прочности зависит еще от долговечности, т. е. от величины напряжения симметричного растяжения- сжатия. При малых долговечностях ковффициент - заметно меньше значения, соответствующего кратковременной прочности. С увеличением долговечности повышается значение причем эначительно быстрее при - 45.

Выводы. 1. Стеклопластик СВАМ на эпокси-фенольном связующем при пульсирующем растяжении разрушается при достижении деформаций определенного значения, не зависящего от напряжения цикла. Величина деформации разрушения зависит от укладки волокон в материале и соответствует деформации порога трещинообразования при статическом растяжении.

2. При пульсирующем растяжении коэффициент усталостной прочности стеклопластика при укладке волокой 5:1 ниже, чем для CBAM-а 1:1.

3. Симметричное растяжение — сжатие CBAM-а меняет свойство анизотропии материала. При этом эффект зависит от долговечности и угла между плоскостью иклического деформирования и главной осью упругой симметрии.

4. Для определения усталостной прочности в любом по отношению к волокну направлении можно пользоваться тензорнальной формулой прочности при статическом растяжении, заменив при этом статические характеристики усталостными.

Инстигут математики и механики АН Армяяской ССР

Поступила 13 V 1969

#### Ն. հ. ՈԱՐԳՈՑԱՆ

## CBAM ՏԻՊԻ ԱՊԱԿԵՊԼԱՍՏՆԵՐԻ ԱՄՐՈՒԹՅՈՒՆԸ ԵԼ ԳԵՖՈՐՄԱՏԻՎՈՒԹՅՈՒՆԸ ԱՌԱՆՑՔԱՅԻՆ ՑԻՎՈԿ ԲԵՌՆԱՎՈՐՄԱՆ ԳԵՊՔՈՒՄ

## Ամփոփում

Ջղման թարակուղ ցիկլերի դեպջում՝ CBAM-ը քայլթայվում է առանցթային գեֆորմացիաների որոշակի արժեթի դեպջում, անկախ ցիկլի լարումից։

CBAM-ի սիժետրիկ ծզում-սեղմումը փոխում է նլուԹի մեխանիկական հատկությունների անիդոտրոպիան։

Ապակեների ճկատմամբ դանկացած ուղղուներերը և Տողճածունվան ումբուխյուրը հրոշելու, չանար կարելի է օգտվել կարճատև ամբության տենգորուին առնութիրներ նման բանաձերց։

#### N. E. SARKISIAN

# THE STRENGTH AND DEFORMATION OF FIBREGLASS REINFORCED PLASTICS "CBAM" UNDER CYCLIC AXIAL LOADING

## Summary

The fatique strength and deformation of fibreglass plastics "CBAM, depending on anisotropic characteristics of material at soft regime of loading is investigated. The influence of fibres direction on the fatique strength is considered.

It is shown that under pulsation extention the "CBAM" is destroyed when the longitudinal deformation reach at determinating value.

### **АИТЕРАТУРА**

- Ашкенази Е. К., Поядняков А. А. Испытавие стеклопластиков на усталость. Заводская лаборатория, т. 27, № 10, 1961.
- 2. Гальнерин М. Я. Сопротивление усталости и рассемине циклической долговечности некоторых стеклопластиков при изгибе. Машинонедение, № 3, 1966.
- 3. Олдырен П. П., Тамуж В. П. Изменение свойств стеклопластика при цихлическом растижении—сжатии. Механика полимеров, № 5, 1967.
- 4. Митропольский А. К. Техника статистических вычислений Физматрия. М., 1961.
- 5. Кортен Х. Т. Разрушение армированных пластиков. Изд-во Химин, М., 1967.
- 6. Олдырев П. П. Исследование деформативных свойств, рассенния анергии и разрущения жестких полимерных материалов при длительном циклическом нагружеики. Авторсферат каяд. дисс., Рига, 1968.
- 7. Ашкенази Е. К. Анизотропия механических свойств некоторых стеклопластикая. Ленингридский дом научно-технической пропаганды. Л., 1961.