

Н. Е. САРКИСЯН

ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМАТИВНОСТЬ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ
ТИПА СВАМ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ ОСЕВОМ НАГРУЖЕНИИ

В настоящей работе излагаются результаты исследования прочностных и деформативных свойств СВАМ-ов при осевом циклическом нагружении в зависимости от анизотропии механических свойств материала. Рассматривается влияние укладки волокон на усталостную прочность стеклопластика.

Исследованию усталостной прочности стеклопластиков СВАМ при симметричном цикле плоского изгиба посвящены работы [1, 2]. В этих работах осуществлялся режим „жесткого“ нагружения, при котором в процессе испытаний сохраняется постоянным амплитудное значение прогиба образца.

Настоящие усталостные испытания проводились в режиме „мягкого“ нагружения (нагрузка $P_0 = \text{const}$). Как известно, при усталостных испытаниях стеклопластиков целесообразным считается применение „мягкого“ режима нагружения, т. к. помимо прочего (отсутствие релаксации напряжений и т. д.) оно дает простой способ непосредственного расчета напряжений в образце. „Жесткий“ же режим нагружения 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 типа СВАМ, изготовленные на ленинградском заводе слоистых пластиков.

СВАМ на эпокси-фенольном связующем имел укладку волокон 1:1 и 5:1. Продольная ось образцов совпадала с направлением волокон. СВАМ на бутвар-фенольном связующем имел равнопрочную укладку стеклошпонов 1:1 и ориентацию образцов $\varphi = 0^\circ$, $\varphi = 22.5^\circ$ и $\varphi = 45^\circ$.

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

Образцы на эпокси-фенольном связующем имели толщину 5 мм и испытывались на пульсирующее растяжение (коэффициент асимметрии цикла $r = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = 0$). Толщина СВАМ-а на связующем БФ-4 составляла 10 мм. Эти образцы подвергались 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 испытаний приведены в табл. 1, где значения деформативных свойств соответствуют начальному линейному участку зависимости напряжение—деформация.



Фиг. 1. Форма и размеры образца.

Все статические и усталостные испытания проводились при температуре окружающей среды $22 \pm 2^\circ \text{C}$ и влажности $67 \pm 5\%$.

Таблица 1

Механические свойства стеклопластиков СВАМ при статическом растяжении

Тип связующего	Укладка волокон	Угол вырезки образца φ , град	Предел прочности σ_b , кгс/мм ²	Коэффициент вариации величины σ_b , %	Модуль упругости E , кгс/мм ²	Относительное удлинение при разрыве δ , %
Эпокси-фенольное	5:1	0	64,09	6,32	4810	1,32
Эпокси-фенольное	1:1	0	43,12	7,52	2960	1,78
Бутвар-фенольное	1:1	0	35,80	2,86	2480	1,56
Бутвар-фенольное	1:1	22,5	13,98	7,07	1170	4,60
Бутвар-фенольное	1:1	45°	8,77	6,51	1040	—

Усталостные испытания проводились на гидропульсаторе ЦДМ-10 Пу. Частота нагружений равнялась 1200 цикл/мин и выдерживалась с точностью до 1%. База испытаний была принята равной 10^6 циклам. Задаваемая нагрузка и коэффициент асимметрии цикла r устанавливались по шлейфовому осциллографу МПО2 и выдерживались ручной регулировкой с точностью $\pm 3\%$. Проволочные датчики сопротивления были наклеены на хвостовую часть корпуса промежуточных захватов. 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, жестко связанные с другой балочкой. Такое устройство при помощи шаблона устанавливалось на образец с базой измерения 30 мм. Тензодатчики, наклеенные на упругие элементы измерителя деформаций, включались в мостовую схему, которая предварительно уравнивалась перед началом испытания. Возникающее в процессе пульсаций изменение электрического сигнала после соответствующего усиления подавалось на шлейфовый осциллограф Н102.

В процессе опытов деформации либо записывались на фотопленку, либо их значение определялось по длине луча на экране осциллографа. При испытании данных образцов 1 мм на экране осциллографов соответствовал напряжению $0.03-0.30 \text{ кгс/мм}^2$ и деформации $7 \times 10^{-5}-14 \times 10^{-5}$ в зависимости от степени усиления первичного электрического сигнала.

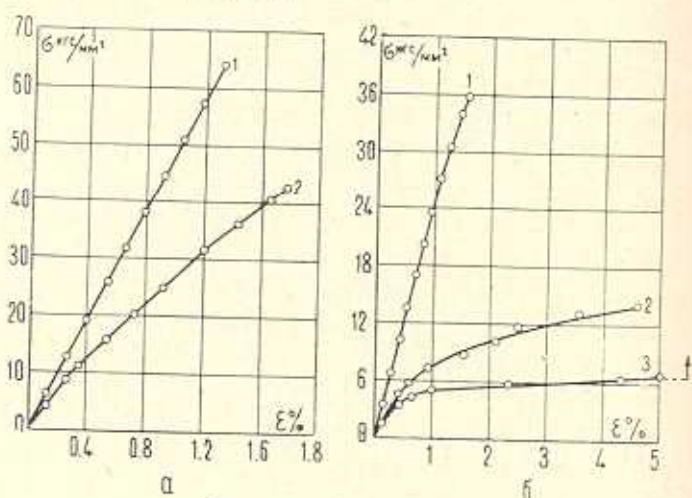
Во всех испытаниях с помощью трех медно-константановых термопар определялась температура саморазогрева материала на поверхности образца. Имеющиеся данные по саморазогреву будут опубликованы дополнительно.

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

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

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

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



Фиг. 2. Зависимость напряжение—деформация при статическом растяжении с—СВАМ на эпоксифенольном связующем, $\varphi=0^\circ$. 1—укладка волокон 5:1, 2—укладка волокон 1:1, б—СВАМ на БФ-4, укладка волокон 1:1, 1— $\varphi=0^\circ$, 2— $\varphi=22.5^\circ$, 3— $\varphi=45^\circ$.

Для материала с укладкой волокон 1:1 довольно четко обнаруживаются две точки перегиба, положение которых определяется соответственно напряжениями $0.26\sigma_n$ и $0.73\sigma_n$ и деформациями 0.34% и

1,20%. Модули упругости второго и третьего участков соответственно составляют 80% и 67% от значения E для начального линейного участка.

Указанные точки перегиба, на которых происходит скачкообразное увеличение повреждаемости, являются „порогами“ трещинообразования. Первый порог возникает, когда прилагаемым напряжением достигается предельное состояние в точках, находящихся в наиболее напряженном состоянии (концевые участки волокон, инородные включения и другие источники местной концентрации напряжений). По достижении верхнего порога ускоряется процесс образования и развития трещин, нарушается совместность работы стекловолокон и полимерного связующего.

Пороги трещинообразования в явном виде не обнаруживались при статическом растяжении стеклопластика, имевшего укладку волокон 5:1. Это объясняется, по-видимому, тем, что наличие сравнительно меньшего числа смежных слоев с взаимно перпендикулярным расположением волокон вызывает сравнительно меньшие концентрации напряжения и растрескивание полимерного связующего [5].

Существует непосредственная связь между деформацией порога трещинообразования при статическом растяжении и разрушением стеклопластика при пульсирующем растяжении.

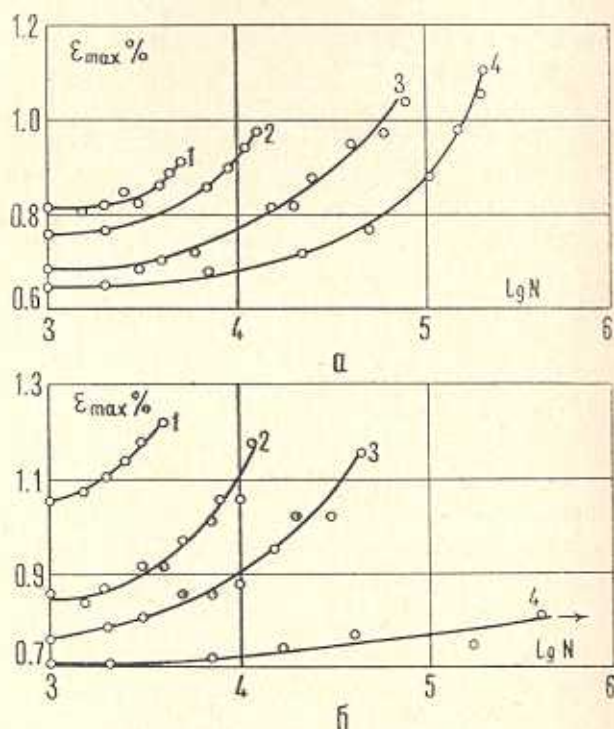
Рассматриваемые усталостные испытания показывают, что начало разрушения стеклопластика СВМ на эпокси-фенольном связующем совпадает с моментом времени, когда деформации достигают определенного значения, не зависящего от величины циклического напряжения и долговечности. Для образцов, имеющих укладку волокон 1:1, она равна 1,20%, что соответствует деформации верхнего порога трещинообразования при статическом растяжении. При этом коэффициент вариации величины средней деформации ε_p , предшествующей разрушению, равен $\pm 4,2\%$. Для СВМ 5:1 средние значения соответственно составляют $\varepsilon_p = 0,98\%$ и $v = \pm 6,05\%$. Отметим, что указанная выше связь между характерными деформациями была ранее установлена в работе [6] при испытаниях на осевое нагружение тканевых стеклопластиков ЭФС и ВФТ-С.

При циклическом нагружении образцы разрушаются хрупко в плоскости, перпендикулярной к оси нагружения. Между тем, разрушение при статическом растяжении происходит с расслоением слоев, что особенно наблюдается на образцах из СВМ 1:1.

На фиг. 3 приведены зависимости величин мгновенной деформации (ε_{max}) при максимальном напряжении цикла от логарифма числа циклов.

Возможно, что фиг. 3 создает впечатление наличия зависимости между конечным значением деформации ε_p перед разрушением и долговечностью. Однако, на самом деле это не так. На фиг. 3 приведена лишь часть экспериментальных кривых, а средняя величина деформа-

ции ε_p определена как средняя из всех опытных данных (для СВМ 5:1 17 экспериментальных точек, а для СВМ 1:1 — 11 точек). Разброс средней деформации ε_p также вычислен на основе всех наблюдений. Полученная небольшая изменчивость средней величины ε_p дает нам возможность считать, что деформация, при достижении которой наступает разрушение, не зависит от циклического напряжения и долговечности (в случае пульсирующего растяжения вдоль направления наибольшего количества волокон).

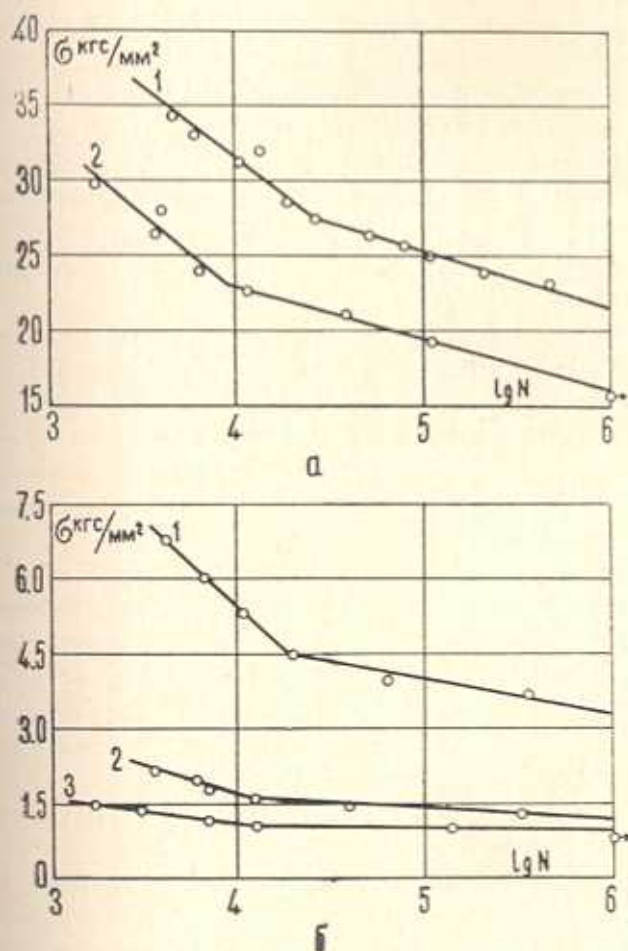


Фиг. 3. Зависимость $\varepsilon_{\max} - \lg N$ для СВМ на эпоксид-фенольном связующем $\varphi = 0^\circ$, $\gamma = 0$. а — укладка волокон 5:1, 1 — $\sigma_{\max} = 34.1 \text{ кгс/мм}^2$, 2 — $\sigma_{\max} = 31.8 \text{ кгс/мм}^2$, 3 — $\sigma_{\max} = 25.8 \text{ кгс/мм}^2$, 4 — $\sigma_{\max} = 24.0 \text{ кгс/мм}^2$; б — укладка волокон 1:1, 1 — $\sigma_{\max} = 28.1 \text{ кгс/мм}^2$, 2 — $\sigma_{\max} = 22.6 \text{ кгс/мм}^2$, 3 — $\sigma_{\max} = 21.1 \text{ кгс/мм}^2$, 4 — $\sigma_{\max} = 18.4 \text{ кгс/мм}^2$.

При пульсирующем растяжении среднее напряжение цикла равно нулю. Поэтому возникает еще отличная от нуля деформация ε_{\min} , которая прогрессирует во времени вследствие циклического разупрочнения и виброползучести материала. Величина деформации ε_{\min} зависит от среднего напряжения цикла и продолжительности циклического нагружения.

Усталостные зависимости $\sigma_{\max} - \lg N$ (N — число циклов до разрушения) лучше всего аппроксимируются двумя линейными корреляционными уравнениями (фиг. 4, а). Первые участки диаграмм характеризуются коэффициентами корреляции -0.956 , а вторые — 0.997 .

Коэффициент усталостной прочности (отношение усталостной прочности к прочности при статическом растяжении) для материала с укладкой стекловолокон 5:1 несколько ниже, чем при укладке 1:1 и на базе 10^6 циклов нагружения составляет соответственно 33,8% и 17,4%.



Фиг. 4. Усталостные диаграммы стеклопластиков типа СВМ. а — на эпоксидном связующем, $\varphi = 0^\circ$, $\tau = 0$. 1 — укладка волокон 5:1, 2 — укладка волокон 1:1; б — на связующем БФ-4, укладка волокон 1:1, $\tau = -1$, 1 — $\varphi = 0^\circ$, 2 — $\varphi = 22.5^\circ$, 3 — $\varphi = 45^\circ$.

Низкий коэффициент усталостной прочности СВМ 5:1 следует объяснить более сильным саморазогревом материала, имеющим место при сравнительно одинаковом уровне напряжения. Например, при напряжении, составляющем 40% от предела прочности материала, разность температур саморазогрева к 50 тыс. циклам нагружения достигает около 40°C .

3. Обсуждение результатов испытаний СВАМ-а 1:1 на бутвар-фенольном связующем.

Зависимость $\sigma - \varepsilon$ при статическом растяжении в случае действия силы вдоль волокон ($\varphi = 0^\circ$) в явном виде имеет одну точку перегиба (фиг. 2, б). Точке перегиба (порогу трещинообразования) соответствует напряжение $\sigma = 29.2 \text{ кгс/мм}^2$ или $0.82\sigma_0$ при $\varepsilon = 1.18\%$. Модуль упругости материала за порогом трещинообразования на 25% меньше по сравнению с начальным.

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

Когда растягивающая сила составляет с волокнами угол $\varphi = 22.5^\circ$ и $\varphi = 45^\circ$, образцы разрушаются с образованием значительной шейки, на которой возникает „бочка“ с сильно развитой трещиноватостью. При этом изломы оказываются зубчатыми и совпадающими с направлением волокон.

Зависимость долговечности от амплитудного значения напряжения в полулгарифмической системе координат линейна и состоит из двух участков независимо от анизотропии механических свойств материала (фиг. 4, б). Как это видно из графика, в случае симметричного растяжения—сжатия в диагональ по отношению к волокнам направлении ($\varphi = 45^\circ$) при $N > 10^4$ циклах практически достигается истинный предел выносливости материала.

Коэффициент усталостной прочности (отношение σ_{-1}/σ_0) СВАМ-ов на базе 10^6 циклов при $\varphi = 0^\circ$ и $\varphi = 22.5^\circ$ примерно одинаков (около 9%) и ниже, чем при $\varphi = 45^\circ$ (11% от предела прочности при статическом растяжении). Однако, это различие зависит от долговечности. При меньших долговечностях ($N < 2 \cdot 10^4$ циклов) коэффициент усталостной прочности практически совпадает в случаях нагружения под углом $\varphi = 22.5^\circ$ и $\varphi = 45^\circ$. Между тем, в случае симметричного растяжения—сжатия вдоль волокон ($\varphi = 0^\circ$) отношение σ_{-1}/σ_0 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 известно, этот вопрос рассматривался лишь в работе [1], где исследовалась усталостная прочность материала при изгибе в плоскости, параллельной волокнам, и в плоскости, составляющей с ними угол $\varphi = 45^\circ$.

Результаты настоящего исследования указывают на возможность применения известного тензорного соотношения [7] для определения усталостной прочности σ_{-1}^{φ} в любом направлении по отношению к волокнам на основании экспериментально полученных величин усталостной прочности $\sigma_{-1}^{0^\circ}$, $\sigma_{-1}^{90^\circ}$ и $\sigma_{-1}^{45^\circ}$.

Формула для определения усталостной прочности имеет вид

$$\sigma_{-1}^{\varphi} = \frac{\sigma_{-1}^0}{\cos^4 \varphi + b \sin^2 2\varphi + c \sin^4 \varphi} \quad (1)$$

где

$$b = \frac{\sigma_{-1}^0}{\sigma_{-1}^{45}} - \frac{c+1}{4}; \quad c = \frac{\sigma_{-1}^0}{\sigma_{-1}^{90}}$$

Усталостная прочность материала в направлении $\varphi = 22.5^\circ$, определенная по формуле (1), совпадает с фактической тем лучше, чем меньше долговечность. Расхождение по базе 10^6 циклов в среднем составляет 12%. Отметим, что в случае оценки кратковременной прочности погрешность составила всего 0.9%.

Данные, приведенные в табл. 2, показывают влияние долговечности на степень анизотропии усталостной прочности СВМ-а. Последнюю определяем как отношение усталостной прочности при данном, по отношению к волокнам, угле нагружения (σ_{-1}^{φ}) к соответствующему значению при $\varphi = 0^\circ$

$$\psi = \frac{\sigma_{-1}^{\varphi}}{\sigma_{-1}^0} \quad (2)$$

Таблица 2

Зависимость степени анизотропии усталостной прочности ($\psi = \frac{\sigma_{-1}^{\varphi}}{\sigma_{-1}^0}$) от долговечности

Угол вырезки, град	Статическое растяжение	Долговечность, циклы				
		$5 \cdot 10^3$	$8 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^4$	10^5	10^6
0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
22.5	0.392	0.320	0.320	0.352	0.368	0.370
45°	0.245	0.194	0.198	0.242	0.260	0.284

Анализ 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 коэффициент ψ заметно меньше значения, соответствующего кратковременной прочности. С увеличением долговечности повышается значение ψ , причем значительно быстрее при $\varphi = 45^\circ$.

Выводы. 1. Стеклопластик СВМ на эпоксифенольном 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 волокон 5:1 ниже, чем для СВАМ-а 1:1.

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

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

Институт математики и механики
АН Армянской ССР

Поступила 13 V 1969

Ե. Բ. ՍԱՐԳՍՅԱՆ

ՇՎԱՄ ՏԻՊԻ ԱՊԱԿԵՊԼԱՍՏՆԵՐԻ ԱՄՐՈՒԹՅՈՒՆԸ ԵՎ ԳԵՅՈՐԾԱՏԻՎՈՒԹՅՈՒՆԸ
ԱՌԱՆՔՔԱՅԻՆ ՑԻԿԼԻԿ ԲԵՌՆԱՎՈՐՄԱՆ ԳԵՊՔՈՒՄ

Ա մ փ ո փ ո ս մ

Ուսումնասիրվում է հոգնածության ամրությունը և զեֆորմատիվությունը փափուկ բևեռավորման_անիզոտրոպիկ ղեպքում՝ կախված նյութի մեխանիկական հատկությունների անիզոտրոպիայից: Դիտարկվում է ապակեթելերի դատավորության ազդեցությունը հոգնածության ամրության վրա:

Զգման բարակող ջրիկերի ղեպքում ՇՎԱՄ-ը քայքայվում է առանցքային զեֆորմացիաների որոշակի արժեքի ղեպքում, անկախ ջրիկի լարումից:

ՇՎԱՄ-ի սիմետրիկ ձգում-սեղմումը փոխում է նյութի մեխանիկական հատկությունների անիզոտրոպիան:

Ապակեթելերի նկատմամբ զանկացած ուղղությամբ հոգնածության ամրությունը որոշելու համար կարելի է օգտվել կարճատև ամրության տենդոբային անչությունը նման բանաձևերից:

N. E. SARKISIAN

THE STRENGTH AND DEFORMATION OF FIBREGLASS
REINFORCED PLASTICS „CBAM“ UNDER CYCLIC
AXIAL LOADING

S u m m a r y

The fatigue 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 fatigue strength is considered.

It is shown that under pulsation extension the „СВМ“ is destroyed when the longitudinal deformation reach at determinating value.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. *Ашкенази Е. К., Поздняков А. А.* Испытание стеклопластиков на усталость. Заводская лаборатория, т. 27, № 10, 1961.
2. *Гальперин М. Я.* Сопротивление усталости и рассеяние циклической долговечности некоторых стеклопластиков при изгибе. Машиноведение, № 3, 1966.
3. *Олдырев П. П., Тамуж В. П.* Изменение свойств стеклопластика при циклическом растяжении—сжатии. Механика полимеров, № 5, 1967.
4. *Митропольский А. К.* Техника статистических вычислений. Физматгиз, М., 1961.
5. *Кортен Х. Т.* Разрушение армированных пластиков. Изд-во Химия, М., 1967.
6. *Олдырев П. П.* Исследование деформативных свойств, рассеяния энергии и разрушения жестких полимерных материалов при длительном циклическом нагружении. Автореферат канд. дисс., Рига, 1968.
7. *Ашкенази Е. К.* Анизотропия механических свойств некоторых стеклопластиков. Ленинградский дом научно-технической пропаганды. Л., 1961.