

ТЕОРИЯ ПОЛЗУЧЕСТИ

М. М. МАРТИРОСЯН

ОБ УЧЕТЕ ВЛИЯНИЯ ОРИЕНТАЦИИ ОБРАЗЦА НА
ЗАВИСИМОСТЬ МЕЖДУ НАПРЯЖЕНИЯМИ И ДЕФОРМАЦИЯМИ
ПОЛЗУЧЕСТИ СТЕКЛОПЛАСТИКА СВАН

Как было отмечено в работах [1, 2, 3], деформации ползучести ориентированных стеклопластиков, помимо величины напряжения, длительности действия нагрузки, температуры, влажности, зависят также от ориентации образца, то есть от направления армирующих волокон. Было показано, что для данного соотношения волокон существует определенная плоскость наименьшей жесткости стеклопластика. При прочих равных условиях деформация ползучести тем больше, чем меньше угол, образованный между направлением деформирования и нормалью к плоскости наименьшей жесткости. Поэтому при построении теории ползучести стеклопластиков следует осуществить экспериментальные и теоретические исследования, учитывающие влияние ориентации волокон материала.

В работе [3] на основании экспериментальных исследований нами уже было отмечено, что имеется линейная зависимость между напряжениями и деформациями ползучести при растяжении образцов СВАН 1:1 в направлении волокон. Однако, сравнительно большие ступени напряжений (недостаточное количество опытов) не позволили определить эту зависимость при других ориентациях.

В настоящей работе, на основе результатов сравнительно многочисленных опытов, вопрос о зависимости между напряжениями и деформациями ползучести стеклопластика СВАН 1:1 количественно решается при разных ориентациях стекловолокон.

Материалом исследования служил СВАН на связующем БФ-4 с соотношением волокон 1:1. Образцы имели форму и размеры согласно ГОСТ 4649—55* и были изготовлены из пятимиллиметровых листов путем механической обработки с применением охлаждающей жидкости (эмульсии). Образцы вырезались в 5-и направлениях и составляли с основным направлением (то есть с направлением волокон) углы 0; 22,5; 45; 67,5 и 90°. Испытания проводились на двухрычажных

* Форма образцов удовлетворительна для испытания в направлении волокон. При других ориентациях форма и размеры образца требуют дополнительных исследований.

установках со 100-кратным увеличением нагрузки. Удлинения измерялись на базе 40 мм механическими тензометрами с точностью 0,01 мм.

Для установления зависимости между напряжениями и деформациями ползучести были выбраны 5 значений относительных напряжений. Так как при относительном напряжении 0,1 σ_b * деформации весьма незначительны, а при 0,7 σ_b со временем наступает разрушение, были выбраны следующие относительные напряжения—0,2; 0,3; 0,4; 0,5 и 0,6 σ_b .

Многочисленными опытами, как и следовало ожидать, установлено, что механические свойства стеклопластика СВМ с соотношением волокон 1:1 имеют полную симметрию по отношению к оси, составляющую 45° с направлением волокон [4]. Следовательно, углы 22,5°—67,5° и 0°—90° в этом смысле эквивалентны. Исходя из этого, при выборе углов мы ограничились углами 0°; 22,5° и 45°, распространяя, однако, полученные результаты на углы 67,5 и 90°. Таким образом, образцы испытывались в 3-х направлениях и в каждом направлении под 5-ью относительными напряжениями.

В табл. 1 указаны количество нагруженных образцов, направления и величины относительных напряжений.

Количество образцов меньше 3-х, нагруженных при относительных напряжениях 0,2 σ_b и 0,3 σ_b , оправдывается тем, что при низких напряжениях разбросы отсчетов отличаются менее, чем на 20%, что, по нашему мнению, вполне приемлемо в опытах на ползучесть.

Таблица 1

Ориентация образцов φ	$\sigma_{\text{ср}}$ в кг/мм ²	σ_i в кг/мм ²	$\frac{\sigma_i}{\sigma_{\text{ср}}}$	Количество образцов в шт.
0	32,0	6,4	0,2	2
		9,6	0,3	2
		12,8	0,4	3
		16,0	0,5	3
		19,2	0,6	3
22,5	15,3	3,05	0,2	2
		4,6	0,3	2
		6,1	0,4	3
		7,6	0,5	3
		9,2	0,6	3
45	9,2	1,8	0,2	2
		2,75	0,3	2
		3,67	0,4	3
		4,6	0,5	3
		5,5	0,6	3

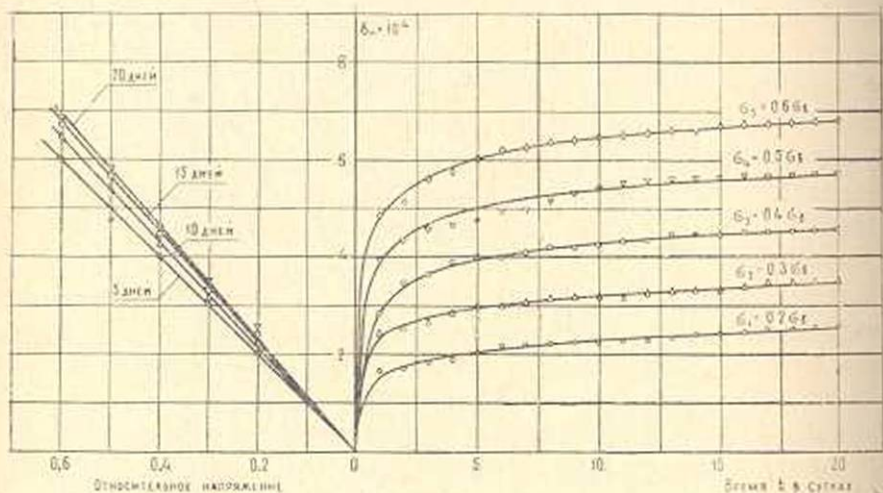
Загружение образцов производилось вручную с помощью маховика червячной передачи, при этом нагрузка на образцы передавалась постепенно в течение 20—30 сек. Момент полного нагружения фиксировался и деформации, соответствующие этому моменту, относились к мгновенным деформациям [3]. В дальнейшем отсчеты по деформации ползучести снимались через каждые 24 часа в течение 20 суток. По средним значениям отсчетов строились графики ползучести.

На фиг. 1, 2, 3 приведены кривые ползучести при разных ориентациях образцов. Каждая кривая на графике соответствует одному относительному напряжению.

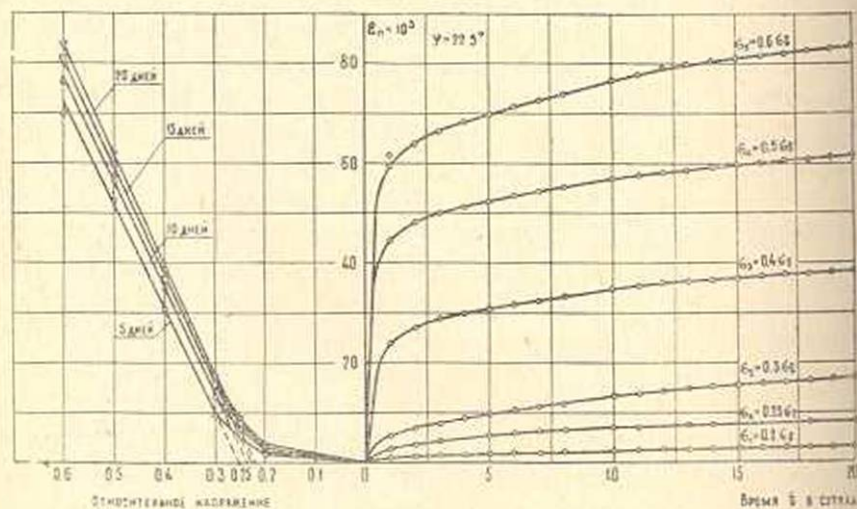
* σ_b — временное сопротивление разрыву при растяжении (кратковременные испытания).

Помимо кривых ползучести, на левой стороне фиг. 1, 2, 3 построены зависимости относительных напряжений от деформаций ползучести для разных длительностей действия нагрузок (в данном случае для 5; 10; 15 и 20-дневных длительностей).

$$\varphi = 0^\circ$$



Фиг. 1.

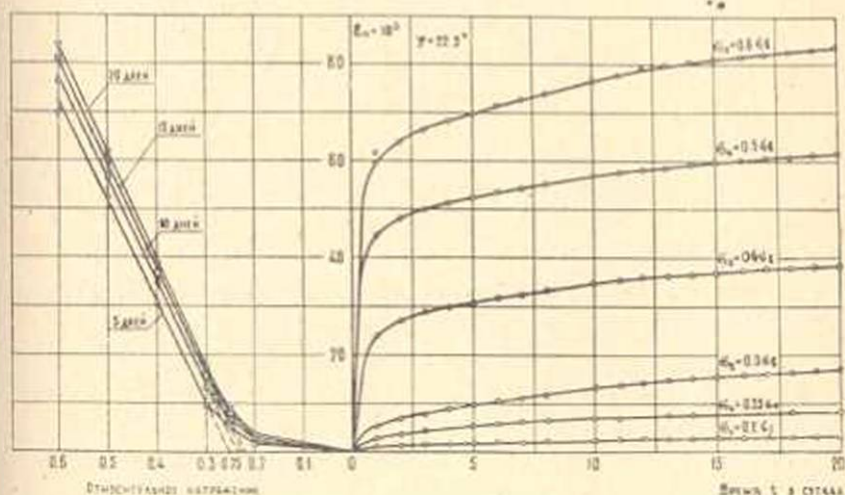


Фиг. 2.

Легко заметить из графиков, что эта зависимость имеет различный характер для образцов с разными ориентациями.

При ориентации образцов 0° и 90° зависимость между относительными напряжениями и деформациями ползучести линейная в пределах принятой базы времени загрузки (20 дней), то есть имеем случай линейной ползучести. Это говорит о том, что физическая

сущность механизма ползучести [3] образцов в направлении волокон от величины относительного напряжения и длительности действия нагрузки не меняется. Совершенно другая картина наблюдается при ползучести образцов с ориентациями $22,5^\circ$ и 45° . В этом случае между относительными напряжениями и деформациями ползучести наблюдается иная закономерность, чем в случае нулевой ориентации. Эта закономерность выражается тем, что до напряжения $0,2 \sigma_b$ и выше $0,3 \sigma_b$ связь между относительными напряжениями и деформациями ползучести подчиняется разным линейным законам.



Фиг. 3.

Такая закономерность строго соответствует механизму ползучести образцов, вырезанных под разными углами к направлению волокон.

Действительно, при ползучести под относительным напряжением $0,2 \sigma_b$ механизм явления в корне отличается от того, который имеет место при высоком уровне относительного напряжения.

Многочисленные опыты показывают, что при разгрузке образцов, ползучесть которых проходила под относительным напряжением до $0,2 \sigma_b$, происходит обратная ползучесть, и вся деформация восстанавливается практически за то время, за которое она была вызвана.

Это говорит о том, что деформации ползучести в этом случае имеют упругий характер (упругие мгновенные и высокоэластические) и что эти напряжения нарушения монолитности системы не вызывают.

Разгрузка образцов ненулевой ориентации, ползучесть которых проходила при высоких уровнях относительных напряжений, показывает, что, кроме упругих деформаций, в этих образцах со временем развиваются остаточные деформации. Эти деформации после

разгрузки не восстанавливаются даже за очень большое время. Мы склонны предполагать, что остаточные деформации являются результатом возникновения трещин в материале и нарушения монолитности системы стекловолокно—связующее. Так как прямые, характеризующие линейную ползучесть в первой и второй областях, пересекаются в зоне относительных напряжений $0,2 \sigma_b$ и $0,3 \sigma_b$, было интересно иметь картину этого перехода. С этой целью были поставлены опыты на ползучесть под напряжением $0,25 \sigma_b$ (см. фиг. 2). Опыты показали, что в этой зоне зависимость между относительными напряжениями и деформациями ползучести выражается кривой.

Для описания кривых ползучести, следуя гипотезе упругоползучего тела [5], воспользуемся выражением

$$\varepsilon_n = C(t) f(\sigma), \quad (1)$$

где ε_n — деформация ползучести,

$C(t)$ — мера ползучести, то есть деформация ползучести в момент t от воздействия единичного напряжения,

σ — напряжение.

При линейной ползучести, то есть когда связь между относительными напряжениями и деформациями ползучести линейная, в выражении (1) $f(\sigma)$ заменяется σ . Таким образом, значение $C(t)$ для случая нулевой ориентации легко можно найти из экспериментальных кривых ползучести.

Для этого достаточно значения деформации ползучести при данном напряжении и времени разделить на величину напряжения, то есть

$$C(t) = \frac{\varepsilon_n}{\sigma}. \quad (2)$$

Если кривые ползучести подобны, то для всего семейства этих кривых выражение (2) должно дать единый график функции $C(t)$.

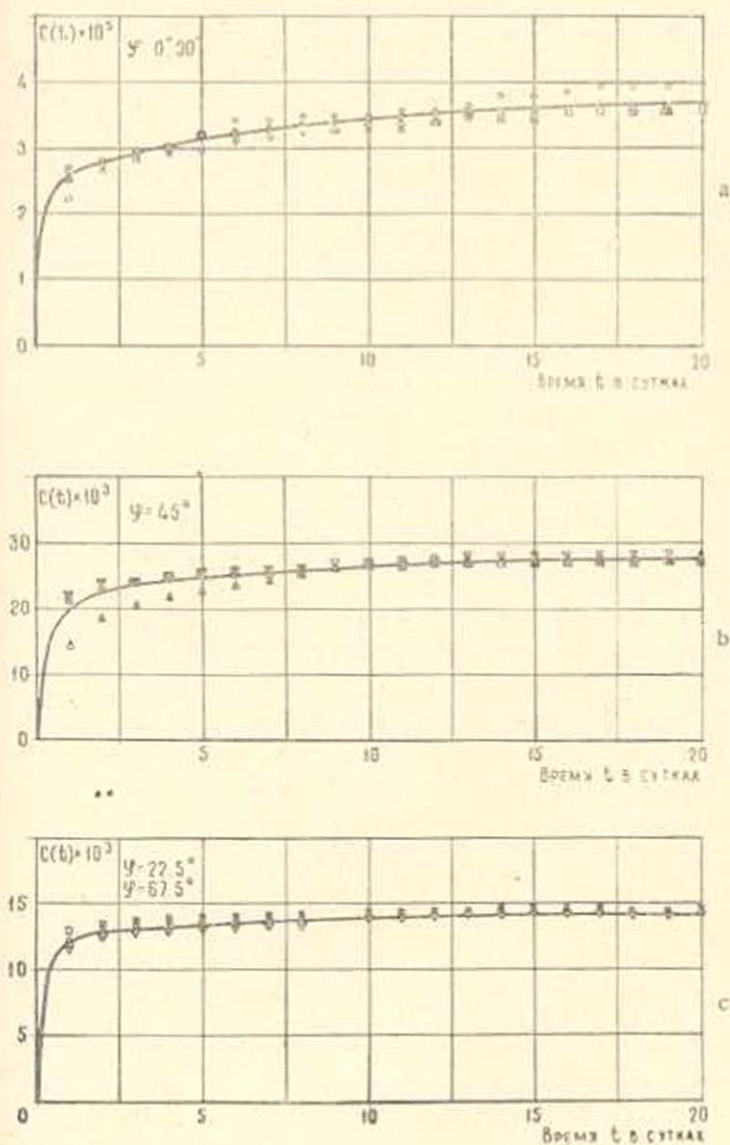
На фиг. 4а приведен график функции $C(t)$ для образцов с ориентацией 0 и 90° . Как видно из графика, кривая функции $C(t)$ дает основание считать кривые ползучести образцов СВМ 1:1 нулевой ориентации, в пределах принятой базы времени, подобными.

Рассмотрим теперь метод определения $C(t)$ для образцов с ориентациями $22,5^\circ$ и 45° .

Как было показано выше, зависимость между относительными напряжениями и деформациями ползучести для образцов ненулевой ориентации выражается двумя прямыми, которые в промежутке

$0,2 < \frac{\sigma_1}{\sigma_b} < 0,3$ соединяются кривой линией. Естественно, такая зависимость значительно осложняет аппроксимацию и может привести к большим отклонениям при описании кривых ползучести. Поэтому для составления аналитического выражения зависимости между относительными напряжениями и деформациями ползучести примем следу-

ющую схему. Рассмотрим всю кривую как состоящую из двух прямых, пересекающихся в зоне напряжений $0,2 \sigma_b - 0,3 \sigma_s$ (см. фиг. 2 и 3). Таким образом, мы получим две области линейной ползучести с двумя мерами ползучести,



Фиг. 4.

Мера ползучести для первой линейной области определится так же, как для случая ползучести образцов нулевой ориентации,

$$\text{то есть } C(t) = \frac{\epsilon_n}{\sigma}.$$

Для второй области понятие меры ползучести в той формули-

ровке, которая была дана выше, несколько условное. Поэтому для определения меры ползучести необходимо значение деформации ползучести разделить на значение напряжения, определенное из уравнения прямой второй области.

Таким образом, для меры ползучести второй области будем иметь

$$C(t) = \frac{\varepsilon_n}{\sigma - b}, \quad (3)$$

где b — расстояние от начала координат до точки пересечения прямой с осью относительных напряжений.

Нетрудно заметить, что b меняется во времени (см. фиг. 2 и 3).

На фиг. 4 (б) и (с) представлены экспериментальные кривые мер ползучести для вторых областей образцов с ориентациями $22,5^\circ$ и 45° . Кривые построены по формуле (3).

Имея форму кривых функции $C(t)$, мы задались целью подобрать для нее аналитическое выражение.

Эксперименты показали, что наиболее удачно эти кривые описываются экспоненциальной функцией.

Следуя Н. Х. Арутюняну [5], для меры ползучести стеклопластика СВМ 1:1 положим

$$C(t) = C_0(\varphi) [1 - [a_1(\varphi) e^{-\gamma_1(\varphi)t} + a_2(\varphi) e^{-\gamma_2(\varphi)t}]], \quad (4)$$

что при подходящем выборе функций $C_0(\varphi)$, $a_1(\varphi)$, $a_2(\varphi)$, $\gamma_1(\varphi)$ и $\gamma_2(\varphi)$ дает достаточно близкое совпадение с экспериментальными кривыми.

Так как $C(0) = 0$, то из (4) следует, что $a_1 + a_2 = 1$.

Насколько удачно выбрано выражение для $C(t)$, можно заключить из фиг. 5 а, б и с. На этих фигурах сплошными линиями показаны теоретические кривые изменения меры ползучести в зависимости от времени для образцов с разной ориентацией. Кружочки обозначают экспериментальные точки.

Для сравнения в табл. 2 приведены значения мер ползучести стеклопластика СВМ 1:1 в зависимости от ориентации образцов по опытным данным и по формуле (4) (в 10^{-3} мм для $\varphi = 22,5^\circ$, 45° и $67,5^\circ$ и в 10^{-6} мм для $\varphi = 0^\circ$ и 90°).

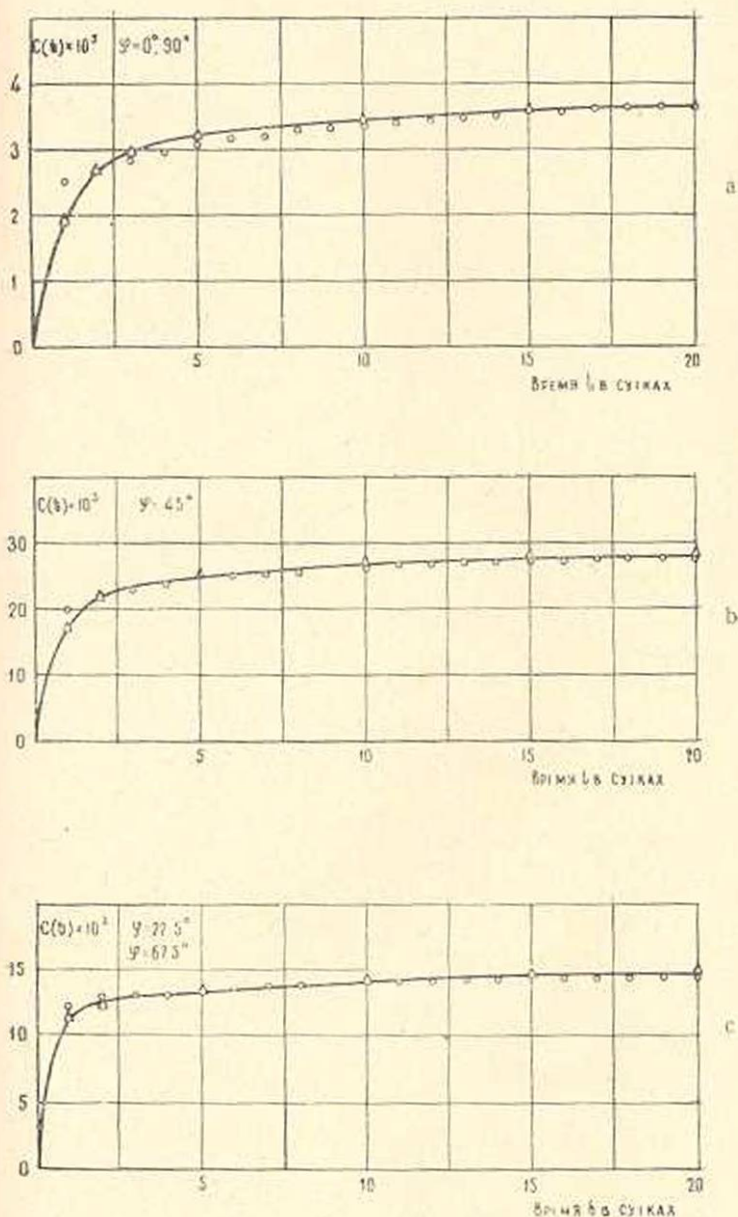
Таблица 2

Ориентация образца	Эксперимент						По формуле						Значения постоянных, входящих в формулу (4)
	1	2	5	10	15	20	1	2	5	10	15	20	
$0^\circ; 90^\circ$	25,2	26,9	31,0	33,7	35,4	36,8	19,6	26,9	32,3	34,7	36,0	36,7	$C_0 = 37,6 \cdot 10^{-6}$ $a_1 = 0,2, a_2 = 0,8$ $\gamma_1 = 0,119, \gamma_2 = 1,07$
$22,5^\circ$ $67,5^\circ$	12,3	13,0	13,5	14,0	14,3	14,5	11,4	12,7	13,5	14,3	14,7	14,9	$C_0 = 15,2 \cdot 10^{-3}$ $a_1 = 0,2, a_2 = 0,8$ $\gamma_1 = 0,12, \gamma_2 = 2,4$
45°	20,0	22,2	24,7	26,4	27,4	27,9	17,6	22,2	25,1	26,9	27,8	28,1	$C_0 = 28,5 \cdot 10^{-3}$ $a_1 = 0,25, a_2 = 0,75$ $\gamma_1 = 0,15, \gamma_2 = 1,5$

Согласно гипотезе упруго-ползучего тела, из (2) и (3) для деформации ползучести имеем

$$\varepsilon_n = C(t) \sigma \quad (5)$$

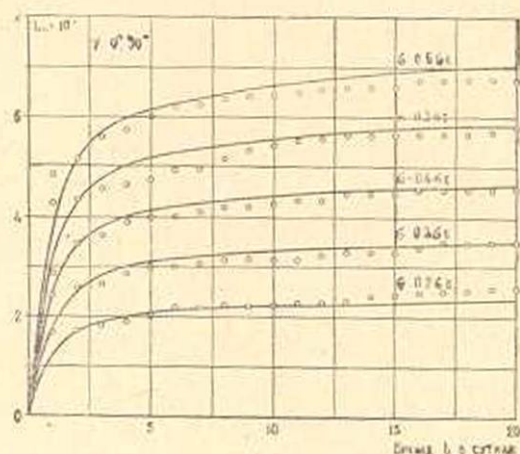
$$\varepsilon_n = C(t) (\sigma - b). \quad (6)$$



Фиг. 5.

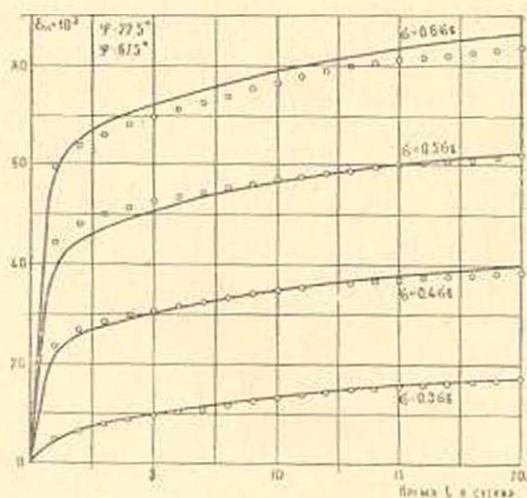
Формула (5) применяется в случае нулевой ориентации образцов ($\gamma = 0^\circ; 90^\circ$) и для первой линейной области при других ориентациях.

Формулой (6) можно пользоваться для второй области ползучести образцов ненулевой ориентации.



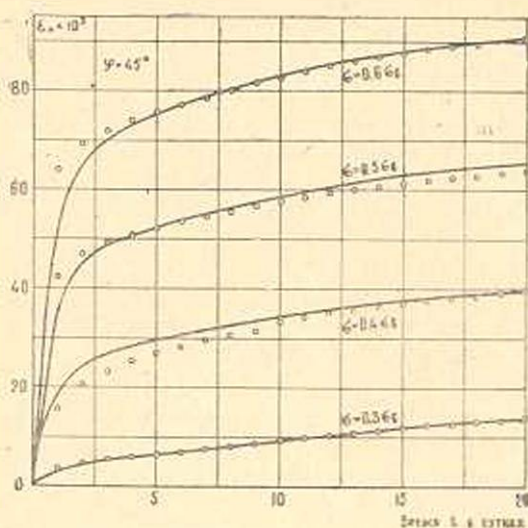
Фиг. 6.

На фиг. 6, 7, 8 сплошными линиями проведены теоретические кривые ползучести СВМ 1:1 при разных ориентациях образцов по



Фиг. 7.

данным табл. 2. Каждая кривая соответствует одному относительному напряжению. Экспериментальные данные обозначены кружочками. Из сравнения приведенных результатов можно заключить, что предло-



Фиг. 8.

женные выражения для определения как меры ползучести, так и деформации ползучести дают удовлетворительные результаты и могут быть применены для практических расчетов.

Институт математики и механики
АН Армянской ССР

Поступила 1 XII 1964

Մ. Մ. ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ

ՏՎԱՄ ԱՊԱԿԵՊԼԱՍՏԻԿ ԽՈՂՔԻ ՂԵՖՈՐՄԱՑԻԱՆԵՐԻ ԵՎ ԼԱՐՈՒՄՆԵՐԻ ՄԻՋԵՎ
ԵՂԱՍ ԿԱՆՎԱԾՈՒԹՅԱՆ ՎՐԱ ՆՄՈՒՇԻ ԿՈՂՄՆՈՐՈՇՄԱՆ
ԱԶԴԵՅՈՒԹՅԱՆ ՀԱՇՎԱՐԿԻ ՄԱՍԻՆ

Ա. մ. փ. ո. փ. ո. մ.

Հորվածում քերված են ՏՎԱՄ ապակեպլաստիկի սողքի ղեֆորմացիաների և լարումների միջև եղած կախվածությունը և քաղցրիմանալ հետադադարձելիությունների արդյունքները:

Պարզված է, որ տարակցող մանրաթելի նկատմամբ 0° կամ 90° անկյուն ունեցող նմուշների համար սողքի ղեֆորմացիաների և լարումների կապը զմային է՝ անկախ լարումների մեծությունից (մինչև $0,6 \sigma_b$ ներառյալ):

Օ-ից տարբեր անկյունների ղեպքում այդ կապը արտահայտվում է մի կերպով, որն ունի երկու դասի, որոնք, կախված լարվածությունից, ենթարկվում են տարբեր զմային օրենքների: Նկարագրելով ՏՎԱՄ ապակեպլաստիկի սողքը առաձգա-սողքային տեսություն միջոցով, տրված է բանաձև՝ սողքի ղեֆորմացիաները հաշվելու համար:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. *Огибалов П. М., Ломакин В. А.* Механические свойства стеклопластиков. Инженерный сборник, 30, 1960.
2. *Огибалов П. М., Тюнчева И. М.* О ползучести СВМ-а при нормальной температуре. Вестник Моск. университета, серия мат. и мех., № 2, 1964.
3. *Мартиросян М. М.* О ползучести стеклопластика СВМ в ранний период после изготовления материала. Известия АН АрмССР, серия физ.-мат. наук, 17, № 5, 1964.
4. *Ашкенази Е. К.* Анизотропия механических свойств некоторых стеклопластиков, ЛДНТП, 1961.
5. *Арутюнян Н. Х.* Некоторые вопросы теории ползучести. Гостехтеориздат, М.-Л., 1952.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Огибалов П. М., Ломакин В. А. Механические свойства стеклопластиков. Инженерный сборник, 30, 1960.
2. Огибалов П. М., Тюнчева И. М. О ползучести СВМ-а при нормальной температуре. Вестник Моск. университета, серия мат. и мех., № 2, 1964.
3. Мартиросян М. М. О ползучести стеклопластика СВМ в ранний период после изготовления материала. Известия АН АрмССР, серия физ.-мат. наук, 17, № 5, 1964.
4. Ашкенази Е. К. Анизотропия механических свойств некоторых стеклопластиков. ЛДНТП, 1961.
5. Арутюнян Н. Х. Некоторые вопросы теории ползучести. Гостехтеориздат, М.-Л., 1952.