

ТЕОРИЯ ПОЛЗУЧЕСТИ

М. М. МАРТИРОСЯН

О ПОЛЗУЧЕСТИ СТЕКЛОПЛАСТИКА СВМ В РАННИЙ ПЕРИОД ПОСЛЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МАТЕРИАЛА

Длительными опытами на старение, при комнатной температуре, стеклопластика СВМ на связующем Э—1200 и БФ—4 установлено, что со временем повышаются как предел прочности материала, (см. табл. 1), так и его сопротивляемость деформированию. Поэтому для получения сопоставимых результатов экспериментов всегда должен

Таблица 1

Соотношение волокон пластины	Предел прочности σ_b кг/мм ²		
	4 мес.	12 мес.	18 мес.
1:1	43,4	53,9	—
1:5	66,6	76,0	—
1:10	70,5	76,5	85,0

быть учтен возраст материала, то есть время, отсчитываемое от момента изготовления материала до момента приложения нагрузки. Особое значение приобретает влияние возраста материала на ползучесть, когда элемент конструкции находится под воздействием длительной нагрузки.

В настоящей работе приведены результаты экспериментального исследования ползучести стеклопластика СВМ, выполненного на образцах через 45 дней после изготовления материала.

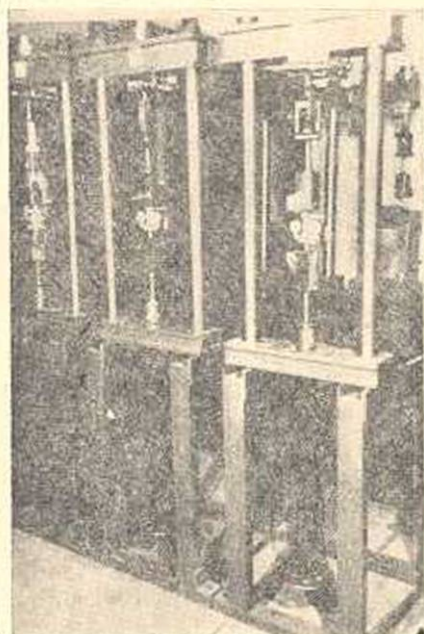
Материалом исследования служил стеклопластик СВМ с соотношением продольных и поперечных волокон 1:1 на связующем БФ—4, изготовленный на ленинградском заводе слоистых пластиков. Образцы были изготовлены с учетом ориентации волокон и составлены с основным направлением углы 0°; 22,5°; 45°; 67,5° и 90°. В каждом направлении образцы нагружались при относительных напряжениях 0,25 σ_b ; 0,5 σ_b и 0,75 σ_b , где σ_b —предел прочности материала на растяжение в момент приложения нагрузки с учетом ориентации.

Для исследования ползучести стеклопластиков были использованы двухрычажные установки (см. фиг. 1). Деформации измерялись на базе 40 мм механическими тензометрами с точностью 0,001 мм. Форма и размеры образца соответствовали ГОСТ 4649—55. Необходимо отметить, что если форма образца (плоская двусторонняя лопатка) удовлетворительна для испытания в направлении волокон, то в остальных направлениях, когда целостность волокон нарушена по краям, влияние формы и размеров образца требует дополнительных исследований.

* Подробно об этом см. литературу [1, 2].

На фиг. 2 приведены экспериментальные кривые ползучести СВАМ, полученные при разной ориентации волокон и различных напряжениях.

Полная деформация образца от воздействия длительной нагрузки складывается из деформации, возникающей в момент нагружения и деформации ползучести, развивающейся во времени.



Фиг. 1.

Деформации в момент нагружения, условно названные мгновенными, в зависимости от величины нагрузки, анизотропии и скорости нагружения имеют разный характер и величину. Эти деформации для всех образцов, независимо от ориентации, имели упругий характер при нагрузках, не превышающих значения предела пропорциональности. При разгрузке эти деформации полностью восстанавливаются со скоростью, равной скорости разгрузки.

Для СВАМ величина предела пропорциональности зависит от анизотропии и возраста материала. В наших экспериментах при ориентации образцов 0 и 90° предел пропорциональности условно приня-

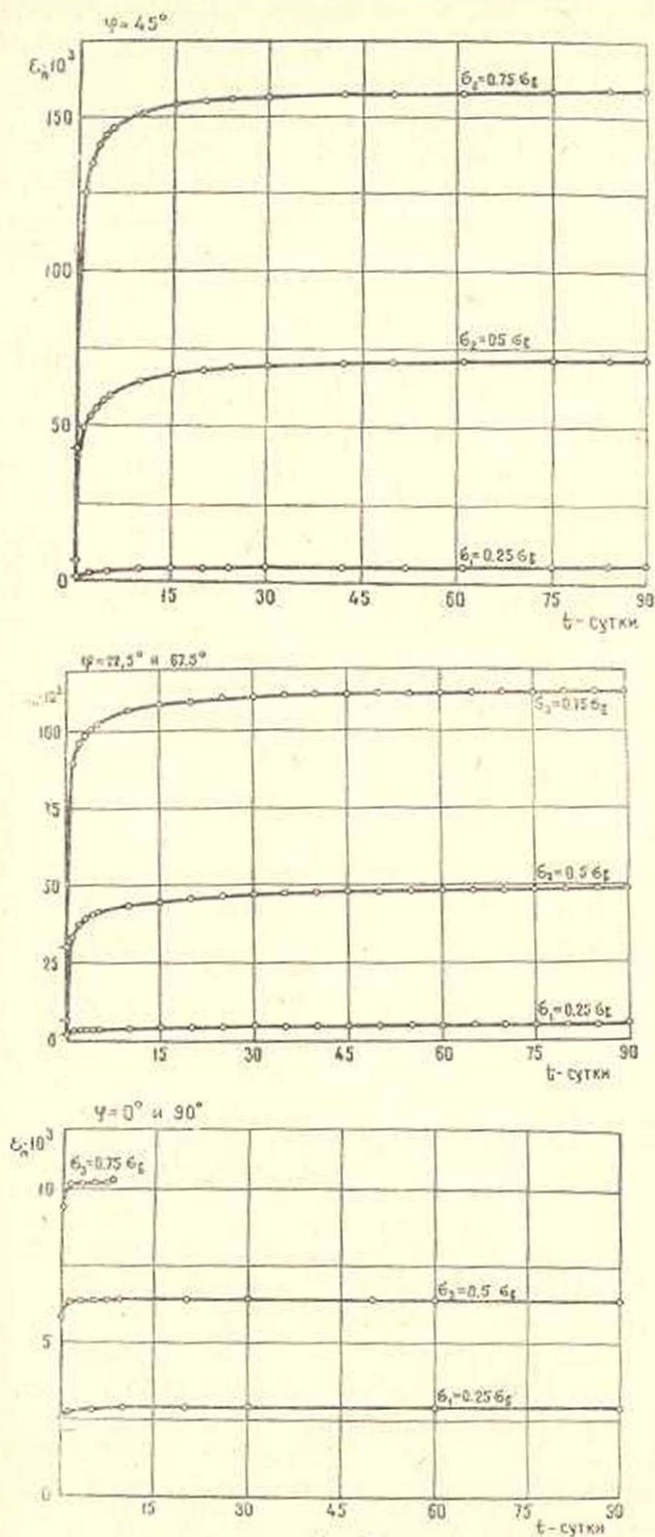
равным пределу прочности, при $22,5^\circ$ и $67,5^\circ$ около $0,4\sigma_b$ и при 45° до $0,3\sigma_b$. Таким образом, мгновенные деформации для образцов ориентацией $22,5^\circ$, 45° и $67,5^\circ$ имели упругий характер только при относительном напряжении $0,25\sigma_b$, а для образцов с ориентацией 0 и 90° —при всех 3-х ступенях напряжений.

В табл. 2 приведены величины мгновенных, упруго-мгновенных деформаций и деформации ползучести в зависимости от ориентации образца и величины относительных напряжений. Приведенные даны

Таблица 2

Угол ориентации	ϵ мгн. $\times 10^3$			ϵ упр. мгн. $\times 10^3$			$\epsilon_n \times 10^3$		
	$0,25\sigma_b$	$0,5\sigma_b$	$0,75\sigma_b$	$0,25\sigma_b$	$0,5\sigma_b$	$0,75\sigma_b$	$0,25\sigma_b$	$0,5\sigma_b$	$0,75\sigma_b$
0° и 90°	2,6	5,9	9,45	2,6	5,9	9,2	0,34	0,54	—
$22,5^\circ$ и $67,5^\circ$	1,7	5,7	30,0	1,7	3,7	5,8	3,8	43,4	83,0
45°	1,5	5,8	43,0	1,5	3,6	5,65	4,7	65,0	116,2

ϵ мгн.—мгновенные деформации в момент нагружения,
 ϵ упр. мгн.—упругие деформации в момент нагружения,
 ϵ_n —деформации ползучести.



Фиг. 2.

являются усредненными от 3-х испытаний. Максимальное отклонение отдельных значений от усредненного не больше 5%. При высоком уровне напряжения и ориентациях, близких к направлению наименьшей жесткости материала, скорость развития деформаций ползучести в момент нагружения очень велика. Для разграничения мгновенных деформаций в этом случае необходимо время приложения полной нагрузки довести до минимума, то есть необходимо, чтобы скорость роста мгновенных деформаций опережала бы скорость развития пластических и высокоэластических деформаций ползучести.

Деформации ползучести слагаются из высокоэластических деформаций, то есть упругих деформаций, развивающихся во времени, и пластических деформаций, также развивающихся во времени. Легко заметить, что деформации ползучести увеличиваются с приближением угла ориентации образца к углу наименьшей жесткости материала. Угол наименьшей жесткости СВАМ зависит от соотношения волокон пластины. При соотношении волокон 1:1 этот угол равен 45° , а в пластинах с соотношением 1:5 и 1:10—больше 45° [2]. Следует особо отметить деформации ползучести образцов с ориентацией 0° и 90° .

Если рассмотреть стеклопластик СВАМ как систему, состоящую из упругого скелета (стекловолокно) и вязкого заполнителя (полимерное связующее), то станет очевидным, что в направлении волокон деформации ползучести будут иметь упругий характер, если нагрузки не превышают значения предела длительной прочности.

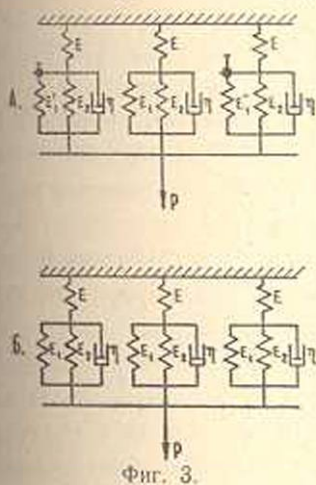
Опыты показали, что при относительных напряжениях $0,25\sigma_b$ и $0,5\sigma_b$, действительно, после разгрузки вся деформация практически восстанавливается за очень короткое время.

При относительном напряжении $0,75\sigma_b$ образцы разрушались в среднем через 190 часов с разбросом 5—6 часов с момента нагружения. Разгрузка контрольных образцов через 150 часов ползучести выявило остаточные деформации, которые не восстанавливались и через 500 часов. Можно предположить, что эти остаточные деформации являются следствием нарушения монолитности системы разрыва отдельных волокон и образования трещин в материале, развитие которых в дальнейшем приводит к разрушению образца.

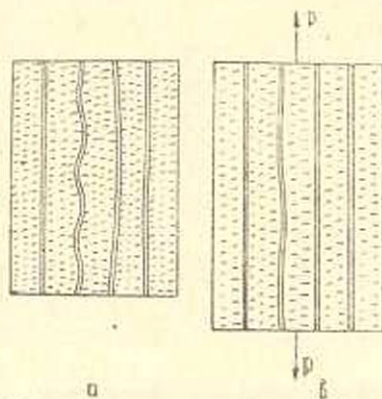
Как видно из кривых ползучести и данных табл. 2, деформации ползучести в направлении волокон весьма незначительны. Развитие этих деформаций происходит с низкой скоростью и уже через 190—260 часов практически прекращается.

Если для описания процесса ползучести в направлении волокон воспользоваться механической моделью, показанной на фиг. 3, можно показать, что при предварительно натянутых волокнах прекращение деформации ползучести наступит раньше. На фиг. 3, 4 схематически показаны сечения СВАМ вдоль волокон, где армирующие стекловолокна натянуты неравномерно. В момент приложения нагрузки материал деформируется, однако, вследствие неодинаковых длин волокон

на нагружаются неодновременно. Таким образом, в начальный момент основное сопротивление деформированию оказывают вязко-упругое связующее и волокна, которые находились в натянутом состоянии. Постепенно, с удлинением материала, в общую схему сопротивления деформированию включаются другие волокна, в результате чего падает скорость ползучести. После натяжения n -ого волокна, когда сопротивление материала деформированию становится выше воздействия нагрузки P , деформация прекращается.



Фиг. 3.



Фиг. 4. а—до нагружения; б—под нагрузкой.

Если нагрузка значительно меньше предела длительной прочности материала, возможно, что в материале окажутся волокна, которые вследствие небольших деформаций всей системы не натянутся и не будут нагружены.

При нагрузках, превышающих предел длительной прочности, одни волокна будут разрываться от чрезмерного натяга, тогда как другие волокна не будут еще нагружены. Очевидно, что это приведет к разрушению материала.

При равномерно натянутых волокнах (фиг. 3б) усилие P воспринимается всеми элементами сразу. Сопротивление деформированию система оказывает одновременно, вследствие чего деформации ползучести будут меньше.

Из схемы видно, что через определенное время вязкие элементы, на которые при деформировании приходилась доля напряжения, после прекращения деформирования совершенно выключаются.

Очевидно, то же самое произойдет с полимерным связующим, в котором со временем, в результате перераспределения напряжений, произойдет частичная релаксация.

Из приведенной схемы можно заключить также, что чем больше приложенная нагрузка, тем раньше наступит равновесие.

В табл. 3 приведены экспериментальные данные деформации ползучести образцов с ориентацией 0° и 90° под разными нагрузками.

Как видно из данных, деформации ползучести образцов, ползучесть которых протекала под относительным напряжением $0,5\sigma_b$, прекращаются на 8 день, тогда как под напряжением $0,25\sigma_b$ — только на 11 день. Из данных табл. 3 можно заключить также, что связь между деформациями ползучести и напряжениями для образцов с ориентацией 0° и 90° — линейная.

Таблица 3

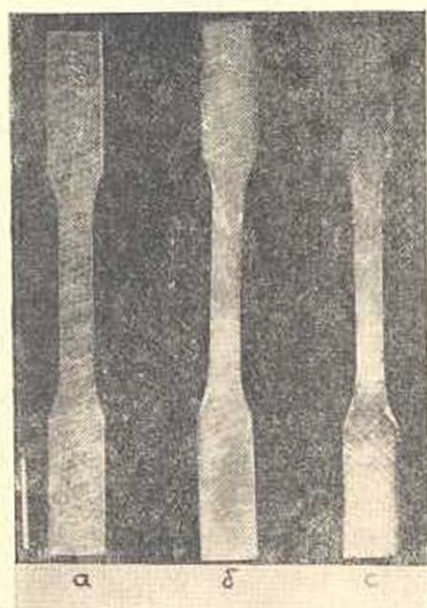
Относительное напряжение	$\varepsilon_p \times 10^3$												
	время t в сутках												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	15	30
$0,25\sigma_b$	0,17	0,21	0,22	0,23	0,23	0,24	0,26	0,27	0,29	0,31	0,34	0,34	0,34
$0,5\sigma_b$	0,4	0,46	0,48	0,5	0,5	0,5	0,52	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54
$0,75\sigma_b$	0,61	0,69	0,73	0,77	0,79	0,81	0,84	0,89	разрыв				

Совершенно новая схема ползучести образцов, вырезанных под разными углами к волокнам. Если за все время ползучести образцов с ориентацией 0° и 90° не были обнаружены изменения поперечного сечения, то в образцах с другой ориентацией первоначальные поперечные сечения значительно изменяются. Эти изменения зависят от

ориентации образца и величины нагрузки. Максимальное сужение наблюдается у образцов с ориентацией 45° . В наших экспериментах у этих образцов при относительном напряжении $0,75\sigma_b$ изменение сечения доходило до 20% по отношению к первоначальному сечению.

В результате удлинения и сужения образца происходит переориентация волокон по направлению растягивающих усилий. Так, угол наклона в 45° после ползучести в течение 2200 часов при относительном напряжении $0,75\sigma_b$ превратился в 31° , а угол $22,5^\circ$ при тех же условиях — в 19° . Помимо сужения, образцы с ориентацией $22,5^\circ$ и $67,5^\circ$ за время нахождения под нагрузкой сильно перекашиваются.

На фиг. 5 приведены фотографии образцов с ориентацией $22,5^\circ$



Фиг. 5. а — до нагружения; б — после ползучести $\varphi=22,5^\circ$; в — после ползучести $\varphi=45^\circ$.

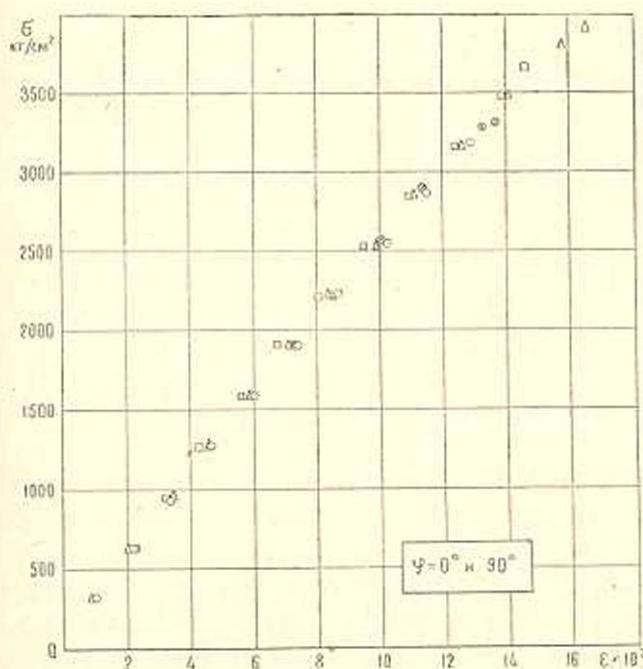
и 45° до и после ползучести. На рисунке хорошо видны как сужение и удлинение, так и перекашивание образца. Повторные эксперименты показали, что перекашивание имеет место при испытании

образцов, в которых взаимно-перпендикулярные волокна в рабочей части не имеют одинаковой длины, то есть когда угол ориентации образца отличен от 45° (кроме образцов с ориентацией 0° и 90°).

Очевидно, что в результате изменения сечений образцов первоначальные напряжения, возникающие от постоянных во времени нагрузок, также изменяются. В табл. 4 приведены значения напряжений, соответствующие сечениям образцов в момент нагружения и через 2200 часов ползучести. опыты показывают (см. фиг. 2), что такие чувствительные повышения напряжений не вызывают увеличения скорости деформаций и перехода в третью стадию ползучести. Испытание образцов, находящихся под различными нагрузками в течение более чем 2200 часов, и контрольных образцов, старение которых проходило в тех же условиях, но без нагрузки, выявило значительное упрочнение первых. На фиг. 6 приведены кривые зависимости относительных удлинений от напряжений для образцов с разными ориентациями, полученные при кратковременных испытаниях.

Таблица 4

Ориентация волокон φ	Относительное напряжение в момент нагружения	Напряжения в образце в $кг/см^2$		Относительное напряжение в конце ползучести	Прирост в %
		при первоначальном сечении	после сужения сечений		
$22,5^\circ$ и $67,5^\circ$	$0,5 \sigma_b$	705	742	$0,53\sigma_b$	6
	$0,75\sigma_b$	1058	1206	$0,86\sigma_b$	14
45°	$0,5 \sigma_b$	532	570	$0,534\sigma_b$	7
	$0,75\sigma_b$	799	969	$0,91\sigma_b$	21



уменьшаются. Этим в основном можно объяснить, почему ощутимое уменьшение поперечных сечений образцов не вызывает повышения скорости ползучести. В табл. 6 приведены изменения относительных напряжений в образцах в результате повышения пределов прочности.

Таблица 5

Градус ориентации образца φ	Перед установкой на ползучесть и старение	Старение в комнатных условиях 2200 часов	Ползучесть при $= 0,25 \sigma_b$ 2200 часов	Ползучесть при $= 0,5 \sigma_b$ 2200 часов	Ползучесть при $= 0,75 \sigma_b$ 2200 часов
	Пределы прочности σ_b в кг/см ²				
0° и 90°	3215	3400	3760	3915	—
$22,5^\circ$ и $67,5^\circ$	1410	1585	1680	1900	2120
45°	1065	1190	1250	1390	1065

Параллельно с экспериментом на ползучесть на контрольных образцах, старение которых проходило в тех же условиях, проверялось наличие деформаций от усадок. С этой целью на образцах-близнецах по ширине и длине были нанесены контрольные метки. Через определенные промежутки времени измерялись расстояния между контрольными метками с точностью 0,5 микрона. Проверка показала, что за время старения более чем 2200 часов размеры образца не изменяются. Следовательно, деформации, развивающиеся во времени, являются только деформациями ползучести, образованными от воздействия постоянной во времени нагрузки.

Таблица 6

Ориентация образца φ	$0,25 \sigma_b^*$	$0,5 \sigma_b^*$	$0,75 \sigma_b^*$
$22,5^\circ$ и $67,5^\circ$	$0,21 \sigma_b$	$0,39 \sigma_b$	$0,57 \sigma_b$
45°	$0,21 \sigma_b$	$0,41 \sigma_b$	$0,59 \sigma_b$

σ_b^* — предел прочности образцов перед установкой на ползучесть.

σ_b — предел прочности образцов после ползучести.

Институт математики и механики
АН Армянской ССР

Поступила 20 V 1964

Ի. Ի. ԿԱՐՏԻՄՅԱՆ

«СВМ» ԱՊԱԿԵՊԼԱՍՏԻԿԻ ՍՈՂՔԸ ՆՅՈՒԹԻ ՊԱՏՐԱՍՏՄԱՆ
ՎԱՂ ԺԱՄԱՆԱԿԱՇՐՋԱՆՈՒՄ

Ա մ փ ն փ ու մ

Հողածուր բերված են «СВМ» ապակեպլաստիկի սողքի էքսպերի-
մենտալ հետազոտությունների արդյունքները նյութի մամլումից 45 օր հետո:
Պարզված է, որ սենյակի նորմալ շերտաստիճանի պայմաններում ապա-
կեպլաստիկների սողքի դեֆորմացիաները կախված են անիզոտրոպիայից,
ազդող ուժի մեծությունից և ժամանակից: Փորձ է արված սողքի դեֆոր-

մացիաների բնույթը ազակցա մանրաթելի ուղղութիւնը՝ նկարագրել մեխանիկական մոդելի օգնութիւնով:

Պարզված է, որ Օ-ից տարբեր անկյունների տակ պատրաստված նմուշների կտրվածքը փորձի ժամանակ զգալի չափով փոքրանում է, որը սակայն չի հանգեցնում սողքի արագութեան ուժի նրկքում իստեղ փորձի ընթացքում: Հետազոտութեանները ցույց են տալիս, որ նմուշների ամրութեան սահմանը աճում է կտրված ալն ուժի մեծութեաններին, որի տակ տեղի էր ունեցել սողքը:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Буров А. К., Андреевская Г. А. Высокопрочные стеклопластики СВММ. Изд. АН СССР, 1958.
2. Ашкенази Е. К. Анизотропия механических свойств некоторых стеклопластиков. ЛДНТП, Л., 1961.
3. Брызгалов Г. И. К расчету на ползучесть пластинок из стеклопластиков. ПМТФ, № 4, 1963.
4. Финдли В. Ползучесть и релаксация напряжений в пластинках. Проблемы высоких температур в авиационных конструкциях. ИЛ, М., 1961.