

НЕКОТОРЫЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ПЛЕНОК БУТВАР-ФЕНОЛЬНОГО ПОЛИМЕРА

*А. Л. Рабинович*

Введение

Стекловолоконистые анизотропные материалы (СВАМ), разработанные Буровым и Андреевской [1—3], являются одним из наиболее типичных и в то же время перспективных стеклопластиков, представляющих собой композиционные материалы. Они состоят из стеклянных волокон и связующего; в качестве последнего можно использовать различные смолы. Наиболее высокие механические характеристики СВАМ до настоящего времени были получены на связующих типа бутвар-фенольного полимера (БФ).

Свойства композиционных материалов определяются свойствами отдельных составляющих и их взаимодействием. Если в качестве первого приближения ограничиться рассмотрением чисто механической совместной работы волокон и связующего, то и для этой цели необходимо располагать механическими характеристиками обоих компонентов.

Свойства стеклянных волокон изучены довольно подробно [4—6]. При этом, в частности, установлено значительное увеличение прочности волокон с уменьшением их диаметра. По связующим типа БФ необходимые данные отсутствуют. В СВАМ эти связующие находятся в виде весьма тонких слоев толщиной 2—3  $\mu$  и менее [2].

Таким образом, возникла необходимость определения основных механических характеристик пленок БФ и установления их зависимости от толщины.

К числу таких характеристик относятся: прочность, функциональная связь между напряжением и деформацией, упругие постоянные, влияние времени на характер деформированного или напряженного состояния.

В настоящей работе<sup>1</sup> приводятся результаты определения некоторых из указанных характеристик для пленок БФ-4 толщиной от 3  $\mu$  и выше.

Образцы и методика испытаний

Пленки для испытаний изготовляли в лабораторных условиях по способу А. М. Генерозова. Подложки из стирофлексовой или триацетатной ленты толщиной 0,03—0,08 мм опускали в сосуд с клеем БФ-4 нужной концентрации. Затем подложки вынимали и некоторое время выдерживали в вертикальном положении, пока не стекали излишки клея. Вслед за этим в течение 18—20 час. производили воздушную сушку в высоких стаканах, после чего пленки отделяли и помещали в термостат для полимеризации при температуре 140—150° (2 часа). Готовые пленки разрезали на прямоугольные полоски размерами 10×140 мм. Каждый образец клеивали в бумажную рамку, аналогичную применяемой при испытании стеклянных волокон.

<sup>1</sup> Экспериментальная часть работы выполнялась в основном О. М. Белавцевой.

Толщину готовой пленки определяли концентрацией клея и количеством «опусканий» подложки перед окончательной сушкой и полимеризацией.

Для испытаний на растяжение применяли весьма простой прибор, представленный на рис. 1.

К коромыслу обычных технических весов (на 0,5 кг) подвешивал стакан и патрон для закрепления верхнего конца образца пленки. Другой

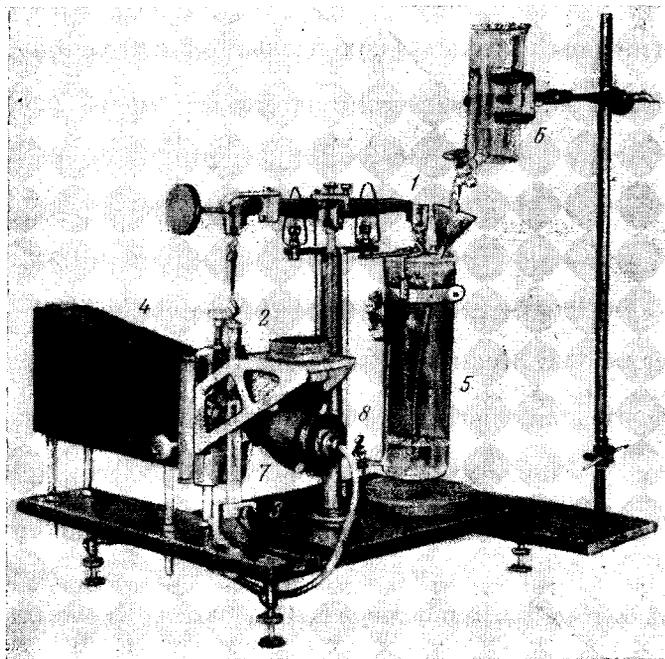


Рис. 1. Прибор для испытания пленок при малой скорости деформации:

1 — коромысло весов; 2 — патрон для зажима образца; 3 — нижний зажим; 4 — увеличительная камера; 5 — грузовой стакан; 6 — мерный стакан; 7 — пленка в бумажной рамке; 8 — осветитель

конец образца закрепляли в неподвижном зажиме, установленном на станине прибора. Так как обращение с тонкими пленками требовало большой осторожности, то закрепление испытуемого образца производили в упомянутой ранее бумажной рамке, а уже затем (после закрепления) рамку разрезали. Нагружение образца производили водой, наливаемой из мерного стакана, снабженного краном, который позволял регулировать скорость подачи воды.

На испытуемую пленку на уровне оси увеличительной камеры ( $\sim 100$  мм от нижнего зажима) поливиниловым клеем приклеивали стеклянное волокно<sup>1</sup>, которое в проходящем свете проектировали на матовый экран, установленный в задней стенке камеры и имевший измерительную шкалу. Цена деления последней равнялась 0,015 мм. Следуя за какой-либо выбранной границей изображения<sup>2</sup>, можно было измерять абсолютное удлинение с точностью до 7—15 м, что обеспечивало точность в измерении относительной деформации, равную, по крайней мере,  $1,5 \cdot 10^{-4} = 0,015\%$ .

<sup>1</sup> Наряду с волокнами в качестве визира использовали отметку, наносимую простыми чернилами.

<sup>2</sup> Многократная проверка показала, что патрон, употреблявшийся для зажима нижнего конца образца, полностью исключал возможность выскальзывания последнего.

В тех случаях, когда нагружение образца вели непрерывно до разрыва, через определенные интервалы времени фиксировали величины нагрузки и деформации в функции времени.

Последнее измерение служило также для контроля скорости деформации, которую поддерживали почти постоянной; она возрастала иногда только перед самым моментом разрушения.

В случаях испытаний при постоянной нагрузке в стакан наливали необходимое количество воды и производили измерение деформации с течением времени.

Толщину пленок определяли в стандартном приборе ИЗВ-1.

Данные испытаний столь тонких пленок, естественно, обладали довольно значительным разбросом, поэтому достоверные результаты можно было получить только статистически на большом числе образцов. Всего было испытано более 400 образцов. Все испытания производили при 20–25°.

### Зависимость модуля упругости и прочности пленок при разрыве от толщины

Как уже указывалось, для стеклянных волокон временное сопротивление при растяжении значительно увеличивается с уменьшением диаметра. Александров и Журков [4], а также Конторова [7] развили статистическую теорию хрупкого разрыва, по которой указанное явление объясняется уменьшением вероятности наличия трещин в волокнах меньшего диаметра.

Известны и другие попытки объяснения этого явления [6].

В случае хрупкого разрыва пленок БФ, на основании статистической теории, следует ожидать заметного увеличения их прочности с уменьшением толщины<sup>1</sup>.

Однако экспериментальные данные по прочности триацетатных пленок толщиной от 10 до 145  $\mu$ , полученные Козловым и Коростылевым, а также данные Котиной [8] свидетельствуют о независимости (или очень слабой зависимости) прочности пленок от толщины. По этой причине для теоретического расчета СВМ особенно важным является установление характера разрушения и фактического соотношения между прочностью и толщиной тонких пленок БФ.

Минимальная толщина, которую удалось получить при изготовлении образцов описанным выше способом, равнялась 2–3  $\mu$ . Для выявления влияния толщины были изготовлены пленки с интервалом толщин в 1  $\mu$ . Однако колебания в толщинах, особенно для наиболее тонких пленок, достигали  $\pm 10\%$ . С целью контроля испытывали более толстые образцы толщиной 100–160  $\mu$ , имевшие стандартную форму лопаточек, а также и прямоугольную.

Результаты испытаний, полученные при постоянной скорости деформации, представлены в табл. 1 и графически на рис. 2, 3. Скорость деформации от образца к образцу менялась в пределах 25–40  $\cdot 10^{-4}$   $\text{мин}^{-1}$  (0,25–0,40%  $\text{мин}^{-1}$ ).

В табл. 1 наряду со средними значениями и пределами отклонений от среднего приведены статистические характеристики (вариационный коэффициент  $\gamma$  и показатель точности<sup>2</sup>  $p$ ), которые свидетельствуют о довольно заметном разбросе.

Однако из данных табл. 1 и рис. 2 вполне отчетливо следует практическая независимость прочности пленок БФ-4 от их толщины.

Так, прочность тонких пленок толщиной от 4 до 16  $\mu$  колеблется в пределах 4,1–4,7  $\text{кг/мм}^2$  и лишь для пленки толщиной 3  $\mu$  достигает

<sup>1</sup> Разумеется в меньшей степени, чем для цилиндрических волокон.

<sup>2</sup> Т. е. процент среднеквадратического отклонения и средней ошибки среднеквадратического по отношению к среднему арифметическому.

Данные испытаний пленок БФ-4 на растяжение

Таблица 1

Толщина пленок			Количество испытанных образцов, шт.	Временное сопротивление, $\sigma$				Модуль упругости, $E$			
номинальная, $\mu$	средняя, $\mu$	мин макс		Среднее значение, $\text{кг/мм}^2$	мин. макс., $\text{кг/мм}^2$	$\nu, \%$	$\rho, \%$	Среднее значение, $\text{кг/мм}^2$	мин. макс. $\text{кг/мм}^2$	$\nu, \%$	$\rho, \%$
3	3,07	2,6 3,5	22	5,26	2,30 7,44	21,7	4,6	345	220 455	18,3	3,9
4	4,01	3,5 4,4	18	4,28	2,73 5,90	22,9	5,4	282	180 400	24,1	5,7
5	4,85	4,5 5,4	17	4,38	2,50 5,92	19,8	4,8	299	180 392	17,7	4,9
6	6,06	5,5 6,4	13	4,23	3,06 5,53	20,1	5,4	284	210 380	18,0	5,0
7	6,99	6,5 7,3	18	3,68	2,06 5,10	21,0	4,9	249	110 325	22,9	5,2
8	8,03	7,5 8,3	11	3,51	2,45 4,88	19,3	5,7	230	186 264	12,6	3,8
9	9,00	8,5 9,4	11	4,33	3,15 5,25	17,3	5,3	275	277 320	13,8	4,5
10	10,10	9,6 10,5	16	4,40	2,39 5,77	5,4	1,1	264	220 330	10,2	1,0
11	10,8	10,7 11,0	4	4,18	3,82 4,67	8,8	4,5	268	190 323	21,6	10,8
12	12,0	11,5 12,4	20	4,43	2,52 5,81	17,4	3,8	278	160 540	25,9	5,9
13	12,9	12,6 13,2	11	4,09	2,68 4,79	16,1	4,9	241	210 280	9,7	2,9
14	14,0	13,8 14,4	4	4,71	4,19 4,90	7,0	3,4	240	200 270	14,8	7,4
15	14,7	14,5 14,9	3	4,51	3,88 5,22	15,1	1,5	236	200 250	4,9	3,5
Среднее по тонким пленкам											
3—15	—	2,6 14,9	168	4,37	2,06 7,44	22,8	1,7	279	110 400	21,1	1,6
Среднее по толстым пленкам											
100—160	—	100 160	10	4,81	3,88 5,84	19,5	3,3	264	200 385	23,9	9,1

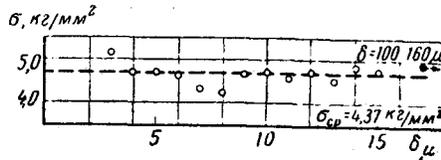


Рис. 2. Зависимость прочности пленок БФ-4 при растяжении от их толщины (по данным табл. 1)

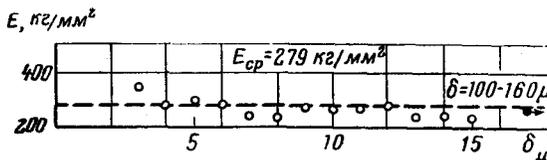


Рис. 3. Зависимость модуля упругости пленок БФ-4 от их толщины (по данным табл. 1)

5,3 кГ/мм<sup>2</sup>. Последняя величина не очень достоверна, поскольку точность измерения толщины пленок в этом случае была недостаточной. В остальных случаях отклонения от среднего значения (4,4 кГ/мм<sup>2</sup>) лежат в пределах 10—18%, что значительно меньше разброса в показаниях отдельных образцов.

Для толстых пленок (толщиной 100—160 м) прочность оказалась даже несколько больше средней величины, полученной для тонких пленок (4,8 кГ/мм<sup>2</sup>). Различие (приблизительно 10%) объясняется тем, что в более толстых пленках меньше сказываются дефекты изготовления образцов. Следовательно, для пленок толщиной 3—15 м среднее значение максимального напряжения при растяжении, с вероятностью 0,997<sup>1</sup>:

$$\sigma = 4,37 \pm 0,23 \text{ кГ/мм}^2.$$

Эта величина имеет место при скорости деформации 25—40 · 10<sup>-4</sup> мин<sup>-1</sup> (0,25—0,40%/мин.). При других скоростях, разумеется, и максимальное напряжение будет иным. Об этом подробнее см. далее.

Диаграммы растяжения в координатах  $\sigma$ ,  $\epsilon$  (напряжение, относительная деформация), полученные при постоянной скорости деформации, обязательно содержат линейный участок, отвечающий упругой обратной деформации, подчиняющийся закону Гука  $\sigma = E\epsilon$  (см. рис. 4). Модуль упругости  $E$  определяли для каждой пленки как угловой коэффициент прямой Гука. Полученные значения приведены в табл. 1 и представлены на рис. 3 в функции толщины пленок. Они свидетельствуют о практической независимости модуля упругости от толщины. Среднее значение, полученное на основании испытаний тонких пленок (3—15 м),  $E = 280 \text{ кГ/мм}^2$  лишь приблизительно на 6% отличаются от значения, полученного для толстых пленок (100—160 м)  $E = 264 \text{ кГ/мм}^2$ . Это отличие много меньше, чем индивидуальные отклонения от среднего у образцов данной толщины.

Таким образом, для пленок БФ-4 можно принять с вероятностью 0,997<sup>2</sup>:

$$E = 279 \pm 13 \text{ кГ/мм}^2.$$

Судя по данным большого числа диаграмм растяжения, формула Гука применима для БФ-4 до  $\epsilon = 1,0$ —1,5%. Дальше отклонение от линейного закона становится очень значительным. Таким образом, хотя удлинение в момент разрыва невелико (оно колеблется от 1,5 до 3%), среднее значение  $\epsilon = 2,2\%$ , но характер разрушения пленок отнюдь не является хрупким<sup>3</sup>.

### Деформированное состояние пленок при растяжении

Приведенные на рис. 4 типичные диаграммы  $\sigma = \sigma(\epsilon)$ , полученные при растяжении пленок с постоянной скоростью деформации, наряду с линейным участком содержат, как уже указывалось, и нелинейный, обладающий явно выраженным асимптотическим характером.

Разумеется, из диаграммы  $\sigma = \sigma(\epsilon)$  нельзя заключить, являются ли нелинейные деформации обратимыми или остаточными. С целью проверки, ряд пленок был первоначально растянут с постоянной скоростью деформации, а затем полностью разгружен.

Типичная диаграмма деформации и функции времени, полученная по указанному режиму, представлена на рис. 5. Если в момент полной раз-

<sup>1</sup> При испытании большого числа образцов, когда можно принять  $\sigma = \sigma_{\text{средн}} \pm 3(p\sigma_{\text{средн}})$ .

<sup>2</sup> При испытании большого числа образцов, когда можно принять  $E = E_{\text{средн}} \pm 3(pE_{\text{средн}})$ .

<sup>3</sup> Следует отметить, что указанная выше малая величина удлинения при разрыве и относительно большой участок нелинейных деформаций БФ, возможно, являются причинами понижения прочности СВМ в случае применения стекловолокон с диаметром менее 12—15 м (см. [2] стр. 69).

грузки удлинение образца равнялось  $\sim 0,6\%$ , то через 25 час. оно составило лишь  $\sim 0,07\%$  и еще продолжало уменьшаться.

Подобная же диаграмма  $\varepsilon = f(t)$  получается после разгрузки образца пленки, предварительно нагруженного постоянным напряжением (см. далее рис. 6).

Следовательно, при комнатной температуре ( $20-25^\circ$ ) в пленках БФ-4 имеет место, главным образом, обратимая деформация, складывающаяся

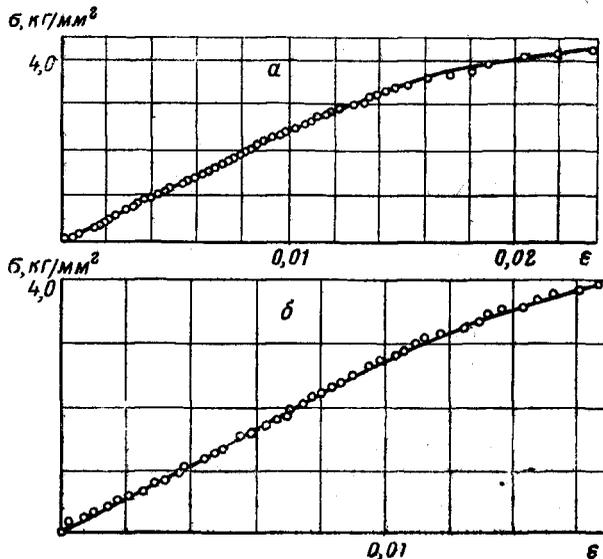


Рис. 4. Диаграммы растяжения пленок при постоянной скорости деформации

*a* — образец 74,  $\delta = 14,1 \mu$ ,  $\sigma_M = 4,2 \text{ кг/мм}^2$ ;  $\varepsilon_M = 0,0236$ ,  $E_{\infty}$ , прив =  $-75 \text{ кг/мм}^2$ ; *b* — образец 146,  $\delta = 11,6 \mu$ ,  $\sigma_M = 3,93 \text{ кг/мм}^2$ ,  $\varepsilon_M = -0,0166$ ,  $E_{\infty}$ , прив =  $160 \text{ кг/мм}^2$ .  $\circ$  — данные эксперимента; — теоретическая кривая, вычисленная по формуле (26)

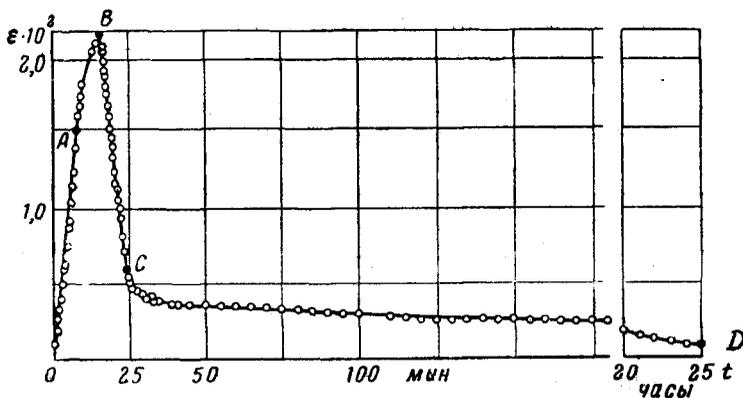


Рис. 5. Зависимость деформации от времени в процессе нагрузки и разгрузки. Образец 194, толщина пленки  $17,8 \mu$

Участок *OA* — нагрузка при  $v_\varepsilon = \text{const}$ ; участок *AB*  $\sigma = \text{const} = -3,3 \text{ кг/мм}^2$ ; участок *BC* — разгрузка при  $v_\varepsilon = \text{const}$ ; участок *CD* — упругое последствие ( $\sigma = 0$ )

из упругой (гуковской) и высокоэластической (упругого последствия), остаточная же (пластическая) деформация практически почти не имеет места.

В большинстве полимеров высокоэластическая деформация, обусловленная механизмом распрямления молекулярной цепочки, достигает

значительных величин. Смола БФ-4 является сравнительно жестким полимером, в котором абсолютная величина обратимой деформации упругого последействия невелика, тем не менее она, по-видимому, обусловлена тем же молекулярным механизмом, представляя собою своеобразный остаток зашитой высокоэластической деформации. Изучению закономерностей высокоэластической деформации посвящено много работ (см., например, [9—12], в которых также приведена обширная библиография), однако экспериментальные данные о БФ-4 отсутствуют. Тем более нельзя считать окончательно установленной теоретическую формулу, выражающую функциональную связь между напряжением, деформацией, температурой и временем, которую можно было бы применить в нашем случае.

Весьма общим уравнением, дающим указанную функциональную связь, является уравнение Максвелла, обобщенное Гуревичем и дополненное им для случая наличия деформации упругого последействия<sup>1</sup>.

В случае малых деформаций при наличии всех трех составляющих деформаций — упругой (гуковской), остаточной и высокоэластической,  $\varepsilon = \varepsilon_{\text{упр}} + \varepsilon_{\text{ост}} + \varepsilon_{\text{ва}}$ , обобщенное уравнение Максвелла при одноосном растяжении может быть представлено в следующем виде<sup>2</sup> (см. [13, 14])

$$v_{\varepsilon} \equiv \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{3GT_1} + \frac{\sigma - E_{\infty} \varepsilon_{\text{ва}}}{3GT_2}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  — суммарная деформация, т. е. относительное удлинение, измеряемое непосредственно;  $\varepsilon_{\text{ва}}$  — высокоэластическая деформация или деформация упругого последействия, которая может быть найдена как разность между полной и остаточной в сумме с упругой;  $G$  — модуль сдвига;  $E_{\infty}$  — модуль высокоэластической деформации; параметры  $T_1$  и  $T_2$  сами являются экспоненциальной функцией напряжения, а  $T_2$  еще и высокоэластической деформации:

$$T_1 = T_{10} \exp [(u_{10} - a_1^* |\sigma|) / k\theta],$$

$$T_2 = T_{20} (1 + E_{\infty} / 3G) \exp [(u_{20} - a_2^* |\sigma - E_{\infty} \varepsilon_{\text{ва}}|) / k\theta]; \quad (2)$$

здесь  $T_{10}$ ,  $u_{10}$ ,  $a_1^*$ , ...,  $a_2^*$  — структурные постоянные, являющиеся константами материала;  $k$  — постоянная Больцмана;  $\theta$  — абсолютная температура.

Три слагаемых в правой части (1) представляют собой соответственно выражения скоростей упругой, остаточной и деформации упругого последействия (высокоэластической). Поэтому, если известно напряжение в функции времени, составляющие упругой и остаточной деформации могут быть вычислены непосредственным интегрированием.

В случае постоянной температуры целесообразно ввести новые обозначения:

$$\eta_{10} = 3GT_{10} e^{-u_{10}/k\theta}, \quad \eta_{20} = 3GT_{20} (1 + E_{\infty} / 3G) e^{-u_{20}/k\theta}, \quad (3)$$

$$1/m_1 = a_1 = a_1^* / k\theta, \quad 1/m_2 = a_2 = a_2^* / k\theta.$$

Константы  $\eta$  представляют собой коэффициенты начальной вязкости, так как при  $\sigma \rightarrow 0$  для неупругой деформации получаем  $v_{\varepsilon} \rightarrow \sigma / \eta$  константы

<sup>1</sup> Другим весьма общим методом получения такой связи является применение теории функционалов [22].

<sup>2</sup> Аналогичные по написанию уравнения для трехмерной задачи были получены Френкелем и Образцовым в работе [21] путем формального обобщения линейных уравнений теории упругости, в предположении постоянства параметров  $T_1$ ,  $T_2$ . Вывод уравнения (1) на основании молекулярной модели и установление экспоненциальной зависимости указанных параметров от напряжения и температуры даны в работах [13, 14].

$m = 1/a$  представляют собой логарифмические модули скорости деформации.

Следует подчеркнуть, что обобщенное уравнение Максвелла в форме (1) справедливо лишь для структурно устойчивых материалов, у которых структура, а значит и постоянные  $u_{10}$ ,  $u_{20}$  не изменяются в процессе деформации.

Поскольку эксперименты показывают почти полное отсутствие остаточной деформации, то для пленок БФ-4 при температуре 20—25° можно приближенно положить  $\eta_{10} \rightarrow \infty$ , после чего уравнение (1) примет такой вид

$$v_\epsilon \equiv \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma - E_\infty \epsilon_{\text{вд}}}{\eta_{20}} e^{a_2 (\sigma - E_\infty \epsilon_{\text{вд}})} \quad (4)$$

При этом деформации пленок будут определяться четырьмя постоянными  $E$ ,  $E_\infty$ ,  $\eta_{20}$  и  $a_2 = m_2^{-1}$ . Две последние являются функциями температуры, как это явствует из формул (3). При учете температуры должна быть известна еще одна постоянная  $u_{20}$ .

Как определение постоянных, так и проверку справедливости уравнения (4) лучше всего проводить в отдельных частных случаях, а именно: после разгрузки — в случае упругого последействия ( $\sigma = 0$ ), при постоянном напряжении ( $\sigma = \text{const}$ ) и при постоянной скорости относительной деформации ( $v_\epsilon = \text{const}$ ).

### Упругое последействие

При изучении последействия пленки растягивали до некоторой деформации  $\epsilon_0$ , после чего нагрузку снимали и измеряли деформацию с течением времени. На рис. 6 приведена типичная кривая  $\epsilon = f(t)$ , полученная указанным путем. Полагая в (4)  $\sigma = 0$ , получим:

$$v_\epsilon \equiv \frac{d\epsilon}{dt} = - \frac{E_\infty}{\eta_{20}} \epsilon e^{a_2 E_\infty \epsilon} \quad (5)$$

Индексы при  $\epsilon$  здесь опущены, поскольку в рассматриваемом случае имеет место только упругое последействие (высокоэластическая деформация).

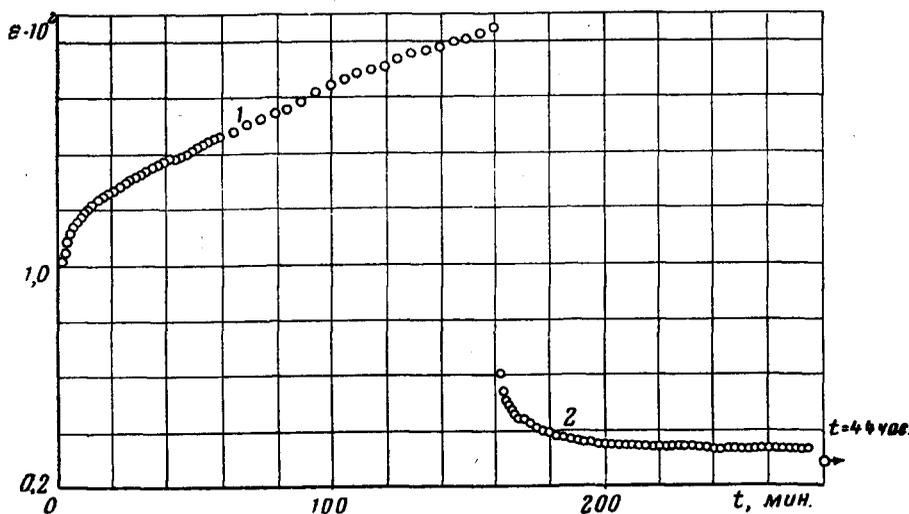


Рис. 6. Деформация упругого последействия.

Образец 420,  $\delta = 7\mu$  был предварительно растянут постоянным напряжением  $\sigma = 3 \text{ кг/мм}^2$ , а затем разгружен

1 — участок  $\sigma = \text{const}$ ; 2 — участок упругого последействия ( $\sigma = 0$ )

Логарифмируя<sup>1</sup> абсолютные величины левой и правой части (5), получим:

$$\varepsilon = [\ln |v_\varepsilon| - \ln (E_\infty \varepsilon / \eta_{20})] / a_2 E_\infty. \quad (6)$$

Если исключить область весьма малых  $\varepsilon$ , то изменение  $\ln \varepsilon$  очень невелико и формула (6) дает практически линейную зависимость между  $\varepsilon$  и  $\ln v_\varepsilon$ . Это приводит к одному из возможных методов определения параметра  $1/a_2 E_\infty$ , как углового коэффициента экспериментальных прямых в координатах  $(\varepsilon, \lg v_\varepsilon)$ .

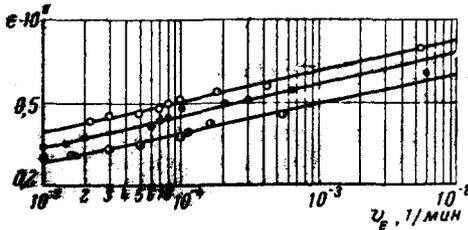


Рис. 7. Зависимость между скоростью деформации и величиной деформации упругого последдействия по данным испытаний трех образцов

○ — образец 115; ● — образец 420; ◐ — образец 423

Следует подчеркнуть, что значения этого параметра отличаются довольно заметными отклонениями от среднего, в силу чего прямые для отдельных образцов оказываются смещенными друг относительно друга. Так, для образца 423 (см. рис. 7) вместо указанной средней величины найдем  $\eta_{20}/E_\infty = 0,4 \cdot 10^6$  мин, а для образца 115 —  $4 \cdot 10^6$  мин.

Интеграл уравнения (5) позволяет получить непосредственное выражение деформации упругого последдействия в функции времени.

Используя начальное условие (при  $t = 0$ ,  $\varepsilon = \varepsilon_0$ ), запишем решение уравнения (5) в таком виде:

$$t = [-Ei(-a_2 E_\infty \varepsilon) + \frac{1}{4} Ei(-a_2 E_\infty \varepsilon_0)] \eta_{20} / E_\infty, \quad (7)$$

где  $Ei(x)$  интегральная показательная функция, которая табулирована (см., например, [15, 16]).

Так как параметр  $a_2 E_\infty \varepsilon \gg 1$ , то, исключая область очень малых  $\varepsilon$ , и для аргумента имеем  $a_2 E_\infty \varepsilon \gg 1$ . При этом для вычисления интегральной показательной функции можно использовать асимптотический ряд, в котором достаточно ограничиться первым членом

$$-Ei(-x) = e^{-x} / x.$$

Тогда вместо (7) получим приближенную формулу:

$$t = \left[ \frac{\exp(-a_2 E_\infty \varepsilon)}{a_2 E_\infty \varepsilon} - \frac{\exp(-a_2 E_\infty \varepsilon_0)}{a_2 E_\infty \varepsilon_0} \right] \eta_{20} / E_\infty. \quad (8)$$

Благодаря большому значению параметра  $a_2 E_\infty$  второе слагаемое внутри скобок в (8) может быть отброшено, по крайней мере при  $\varepsilon < (\varepsilon_0 - 0,001)$ . При этом условии формула (8) позволяет определять

<sup>1</sup> Величины  $v_\varepsilon$ ,  $a_2$ , размерные, поэтому во избежание ошибок, при использовании полулогарифмических координат, следует помнить о их размерности. Здесь всюду принято для  $v_\varepsilon$  — 1/мин,  $1/a_2$  и  $E$  —  $\kappa\Gamma/\text{мм}^2$ ,  $\eta$  —  $\kappa\Gamma \cdot \text{мин}/\text{мм}^2$ .

<sup>2</sup> Величину  $v_\varepsilon$  определяли численным дифференцированием экспериментальной кривой  $\varepsilon = f(t)$ .

постоянные, не прибегая к вычислению скоростей деформации. Действительно, при указанном условии из формулы (8) следует:

$$a_2 E_{\infty} \cong \frac{1}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} \ln \frac{t_2 \varepsilon_2}{t_1 \varepsilon_1}, \quad \frac{\eta_{20}}{E_{\infty}} \cong t (a_2 E_{\infty} \varepsilon) \exp(a_2 E_{\infty} \varepsilon), \quad (9)$$

где  $\varepsilon t$  — координаты экспериментальной кривой (см., например, рис. 6), а  $\varepsilon_i, t_i$  — любая пара значений координат этой же кривой.

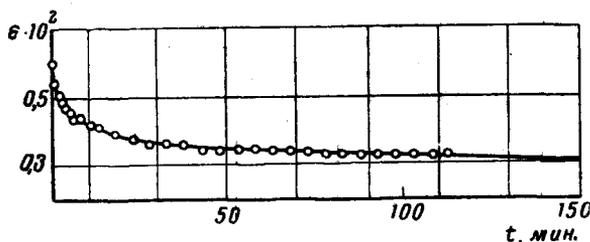


Рис. 8. Сравнение экспериментальных данных (образец 420) с теоретической кривой упругого последствия по формуле (8)

○ — эксперимент; — теоретическая кривая

На рис. 8 дано сравнение экспериментальных данных образца с теоретической кривой, вычисленной по формуле (8) при значениях параметров:  $a_2 E_{\infty} = 2090$ ,  $\eta_{20}/E_{\infty} = 0,62 \cdot 10^6$  мин.

Как видно из сравнения, приближенная формула (8) удовлетворительно согласуется с экспериментом.

### Растяжение пленок при постоянном напряжении

Полагая в (1)  $\sigma = \text{const}$  и отбрасывая член со скоростью остаточной деформации, приходим к следующему выражению:

$$v_{\varepsilon} \cong \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\sigma - E_{\infty} \varepsilon_{в\theta}}{3GT_{20}(1 + E_{\infty}/3G)} \exp[-(u_2 - a_2^* |\sigma - E_{\infty} \varepsilon_{в\theta}|) / k\theta]. \quad (10)$$

Здесь возможны два существенно разных предельных случая.

В первом высокоэластическая деформация успевает развиться в процессе растяжения настолько, что слагаемое  $E_{\infty} \varepsilon_{в\theta}$  оказывается одного порядка с напряжением, тогда с течением времени скорость деформации будет убывать и при  $\sigma = E_{\infty} \varepsilon_{в\theta}$  станет равной нулю. Как легко усмотреть из (10), чем выше температура, тем быстрее может наступить такой момент. При нормальной температуре (20—25°) описываемый случай трудно реализовать для пленок БФ, он будет возможен лишь при весьма малых напряжениях и сравнительно большой величине  $E_{\infty}$ <sup>1</sup>.

На рис. 9 приведена подобная диаграмма, полученная для одного из образцов.

Как известно, такие диаграммы «равновесной» эластической деформации еще со времени появления работы [20] используются для определения модуля высокоэластической деформации, поскольку в этом равновесном случае  $E_{\infty} = \sigma / \varepsilon_{в\theta, м}$ , где  $\varepsilon_{в\theta, м}$  максимальная (равновесная) дефор-

<sup>1</sup> Следует подчеркнуть, что при длительном растяжении малыми напряжениями часто наблюдается ориентация пленок, обуславливающая их упрочнение в процессе растяжения, которое нарушает монотонный характер кривой  $\varepsilon = \varepsilon(t)$ .

мадия. При отсутствии остаточной деформации величина высокоэластической будет

$$\varepsilon_{\text{вв}} = \varepsilon - \varepsilon_{\text{упр}} = \varepsilon - \sigma / E.$$

Во втором из указанных выше предельных случаев слагаемое  $E_{\infty} \varepsilon_{\text{вв}}$  столь мало в сравнении с  $\sigma$ , что может быть вовсе отброшено; тогда скорость деформации оказывается постоянной.

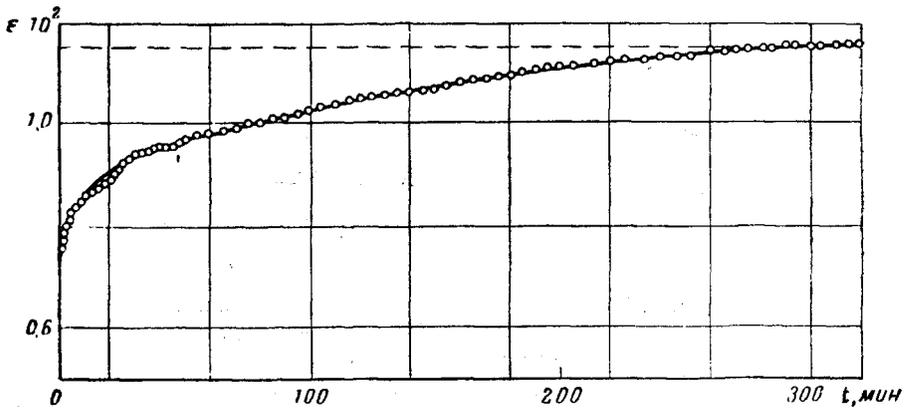


Рис. 9. Растяжение пленки при  $\sigma = \text{const}$  в случае малого напряжения.

Образец 322,  $\delta = 7,6 \mu$ ;  $\sigma = 2,2 \text{ кг/мм}^2$

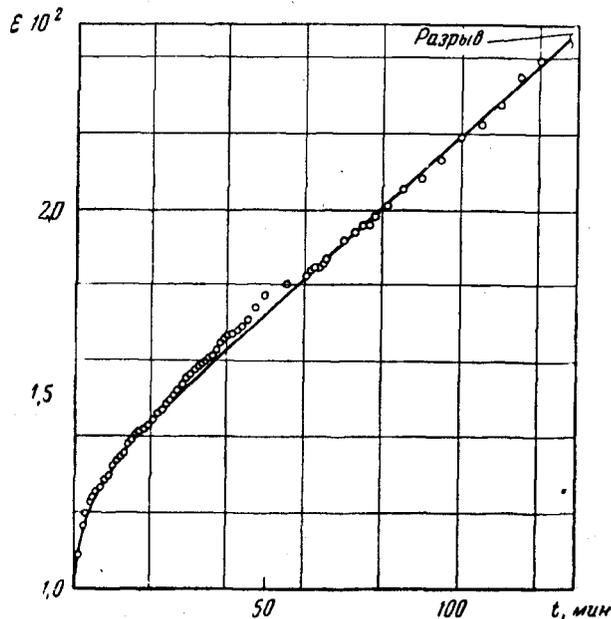


Рис. 10. Диаграмма деформаций при растяжении пленок постоянным напряжением.

Образец 215,  $\delta = 7,2 \mu$ ,  $\sigma = 3,89 \text{ кг/мм}^2$ . Установившаяся скорость деформации  $0,93 \cdot 10^{-2} \text{ мин}^{-1}$  (остаточная деформация, измеренная после разрыва образца, равна нулю)

На рис. 10 приведена диаграмма деформаций  $\varepsilon = \varepsilon(t)$ , типичная для второго случая. Вначале скорость деформации несколько убывает, а затем, действительно, остается постоянной вплоть до разрушения или несколько возрастает перед самым моментом разрыва.

В рассматриваемом случае ( $E_{\infty} \epsilon_{вв} \ll \sigma$ ), используя обозначения (3), придадим уравнению (10) следующий вид:

$$v_{\epsilon} \equiv \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{\sigma}{\eta_{20}} e^{a_2 \sigma} \quad (11)$$

Логарифмируя левую и правую части, получим:

$$\sigma = [\ln v_{\epsilon} + \ln (\eta_{20} / \sigma)] / a_2 \quad (12)$$

Второе слагаемое внутри скобок изменяется очень незначительно для разных напряжений, поэтому уравнение (12) практически дает линейную зависимость между  $\sigma$  и  $\ln v_{\epsilon}$ .

На рис. 11 в полулогарифмических координатах приведены данные испытаний 17 образцов. Каждый образец растягивался определенной постоянной нагрузкой либо до разрушения, либо до получения достаточно большого удлинения (2—3%). Скорость деформации для каждой из пленок определяли по наклону прямолинейного участка диаграммы  $\epsilon = \epsilon(t)$ , подобной приведенной на рис. 10.

Как и нужно было ожидать, экспериментальные точки на рис. 11 обнаруживают довольно заметный разброс, однако в среднем они следуют линейной зависимости, вытекающей из уравнения (12). При этом диаграмма на рис. 11 позволяет определить два из четырех основных параметров. Угловой коэффициент прямой дает значение модуля скорости деформации упругого последствия (высокоэластической деформации)  $m_2 = 1/a_2$ ,

$$a_2 \cong 2,80 \text{ мм}^2 / \text{кг}.$$

Ордината прямой при  $v_{\epsilon} = 1$  позволяет легко вычислить значение коэффициента начальной вязкости:

$$\eta_{20} \cong 1,1 \cdot 10^9 \text{ кг} \cdot \text{мин} / \text{мм}^2.$$

Ранее было найдено, что  $a_2 E_{\infty} \cong 2090$ . Следовательно, для модуля высокоэластической деформации найдем  $E_{\infty} \cong 700 \text{ кг} / \text{мм}^2$ , что по порядку величины совпадает с получаемым на основании диаграммы рис. 9<sup>1</sup>.

Величина  $\eta_{20}$  также согласуется со значением  $\eta_{20} / E_{\infty}$ , полученным ранее.

Модуль высокоэластической деформации оказался значительно больше модуля упругости. Аналогичный результат был получен Канавцом при экспериментальном исследовании некоторых пластмасс, изготовленных на основе фенольно-формальдегидных смол (см. [19]).

В общем случае, при неизменной температуре уравнение (10) можно переписать в такой форме:

$$v_{\epsilon} \equiv \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{f}{\eta_{20}} \exp f, \quad (13)$$

<sup>1</sup> Правда, приведенная величина больше среднего значения, полученного далее на основании обработки данных испытаний большого числа образцов, но находится в пределах возможных отклонений от среднего.

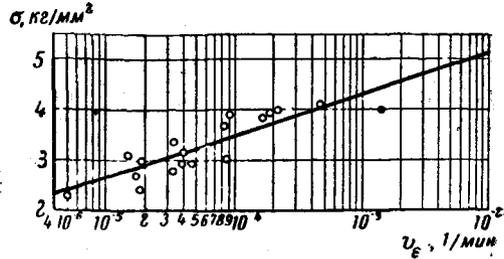


Рис. 11. Зависимость между максимальным напряжением и скоростью относительной деформации:

○ — данные испытаний при  $\sigma = \text{const}$ ; ● — точно, полученная при  $v_{\epsilon} = \text{const}$  (координаты:  $f_m = 4,0 \text{ кг} / \text{мм}^2, v_{\epsilon} / (1 + E_{\infty} / E) = 1,45 \cdot 10^{-2} \text{ мин}^{-1}$ ).

где использовано обозначение

$$f = \sigma - E_{\infty} \varepsilon_{вв} = \sigma (1 + E_{\infty} / E) - E_{\infty} \varepsilon. \quad (14)$$

После исключения  $\varepsilon$  из (13) и (14) приходим к следующему дифференциальному уравнению для случая  $\sigma = \text{const}$  взамен (10) или (13)

$$\frac{df}{dt} = - \frac{E_{\infty}}{\eta_{20}} f e^{a_2 f}. \quad (15)$$

Полученное уравнение относительно  $f$  по форме совпадает с имевшим место в случае чистой высокоэластической деформации относительно  $\varepsilon$  (5). Его решение будет вполне аналогично (7)

$$t = [-Ei(-a_2 f) + Ei(-a_2 f_0)] \eta_{20} / E_{\infty}; \quad (16)$$

через  $f_0$  обозначено начальное значение функции  $f$ . Принимая за начальный момент, отвечающий практическому завершению упругой деформации, когда напряжение достигает максимального значения (при  $t = 0$   $\varepsilon = \varepsilon_{упр} = \sigma / E$ ), имеем  $f_0(\sigma, \varepsilon) = \sigma$ .

При больших значениях аргумента  $a_2 f$ , используя для интегральной показательной функции первый член асимптотического разложения, приходим к приближенному выражению аналогичному (8),

$$t = \left[ \frac{\exp(-a_2 f)}{a_2 f} - \frac{\exp(-a_2 \sigma)}{a_2 \sigma} \right] \eta_{20} / E_{\infty}, \quad (17)$$

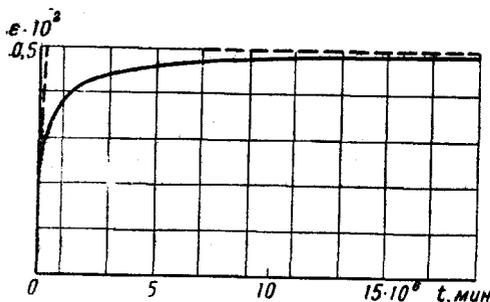


Рис. 12. Зависимость деформации от времени при постоянном напряжении — по уравнению (17)

где  $f(\sigma, \varepsilon)$  дано формулой (14). Характер зависимости деформации от времени по формуле (17) представлен на рис. 12. Из общего решения следует, что при  $f \rightarrow 0$ , когда  $\sigma \rightarrow E_{\infty} \varepsilon_{вв}$ ,  $t \rightarrow \infty$  — наступает равновесная деформация, т. е. первый из рассмотренных выше предельных случаев (рис. 9).

При  $f \rightarrow \sigma$ , когда  $E_{\infty} \varepsilon_{вв} \ll \sigma$ ,  $t \rightarrow \eta_{20} \varepsilon_{вв} \exp(-a_2 \sigma) / \sigma$  — скорость деформации оказывается постоянной (что видно и непосредственно из (13)), ее выражение совпадает с формулой (11), т. е. приходит ко второму из рассмотренных предельных случаев (рис. 10).

### Растяжение пленок при постоянной скорости относительной деформации

Исключая при помощи соотношения  $v_{\varepsilon} \equiv d\varepsilon / dt = \text{const}$  время из уравнения (4), получим дифференциальное уравнение диаграммы растяжения в таком виде:

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = E \left[ 1 - \frac{f}{\eta_{20} v_{\varepsilon}} e^{a_2 f} \right], \quad (18)$$

где при помощи  $f$  обозначена та же функция, что и в (14). Уравнение (18) можно еще представить в такой форме, если исключить  $\sigma$ ,

$$\frac{df}{d\varepsilon} = E \left[ 1 - \left( 1 + \frac{E_{\infty}}{E} \right) \frac{f}{\eta_{20} v_{\varepsilon}} e^{a_2 f} \right]. \quad (19)$$

В случае, когда модуль высокоэластической деформации очень мал ( $E_{\infty} \rightarrow 0$ ), уравнение (19), или непосредственно (18), переходит в

следующее:

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = E \left[ 1 - \frac{\sigma}{\eta_{20} v_\varepsilon} e^{a_2 \sigma} \right]. \quad (20)$$

Это уравнение по форме совпадает с тем, которое имеет место в случае отсутствия высокоэластической деформации, когда основную роль, наряду с упругой, играет лишь остаточная деформация<sup>1</sup>.

Диаграмма растяжения по формуле (20) имеет вид предельной кривой — при достижении максимального напряжения ( $\sigma_{\max} = \sigma_m$ ), касательная к ней оказывается практически горизонтальной (см. рис. 13). При этом соотношении между  $\sigma_m$  и  $v_\varepsilon$  определяется формулой (11). Следовательно, в случае  $E_\infty \varepsilon_{\text{вз}} \ll \sigma$ , как и при остаточной деформации, связь между максимальным напряжением и установившейся скоростью деформации оказывается одинаковой при режимах  $\sigma = \text{const}$  и  $v_\varepsilon = \text{const}$ . Лазуркин в работе [9], при исследовании высокоэластической деформации

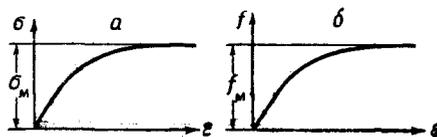


Рис. 13. а — диаграмма растяжения в случае остаточной деформации; б — зависимость  $f(\sigma, \varepsilon)$  от  $\varepsilon$  по уравнению (19)

большого числа полимеров, у которых  $E_\infty \ll E$ , использовал связь между скоростью деформации и напряжением в указанной выше форме. При этом как в [9], так и в [23] подчеркивалось, что отмеченная формальная аналогия в поведении тел при остаточной и высокоэластической деформации приводит многих исследователей к ошибочному смешению остаточной (необратимой) и высокоэластической (обратимой) деформации.

В общем случае, когда величину  $E_\infty / E$  нельзя считать малой, указанная аналогия не имеет места. В то же время уравнение (19) относительно  $f$  с точностью до постоянного множителя совпадает с уравнением (20) — относительно  $\sigma$ . Следовательно, функция  $f = f(\varepsilon)$  имеет вид аналогичной кривой на фиг. 13, а; при  $df/d\varepsilon = 0$  она приобретает максимальное значение, определяемое из соотношения

$$v_\varepsilon = (1 + E_\infty / E) f_m e^{a_2 f_m} / \eta_{20}. \quad (21)$$

Сравнивая (21) и (11), убеждаемся в том, что при высокоэластической деформации, в отличие от остаточной, соотношение между  $\sigma_m$  и  $v_\varepsilon$  при режимах  $v_\varepsilon = \text{const}$  и  $\sigma = \text{const}$ , даже по форме уравнений, не идентичны друг другу.

Нетрудно показать, что условие  $df/d\varepsilon = 0$  определяет направление прямой, являющейся асимптотой кривой  $\sigma = \sigma(\varepsilon)$ , для которой угловой коэффициент

$$E_{\infty, \text{прив}} = \left( \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right)_{\varepsilon \rightarrow \infty} = \frac{E_\infty}{1 + E_\infty / E} = \frac{E}{1 + E / E_\infty}. \quad (22)$$

Таким образом, интегральная кривая  $\sigma = \sigma(\varepsilon)$ , соответствующая уравнению (19), имеет вид, представленный на рис. 14.

Обозначим отрезок, отсекаемый асимптотой на оси ординат, через  $\sigma^*$ . При этом уравнение асимптоты:  $\sigma = \sigma^* + E_{\infty, \text{прив}} \varepsilon$ .

Следовательно, предельное значение функции  $f(\sigma, \varepsilon)$  будет:

$$f_m = [\sigma (1 + E_\infty / E) - E_\infty \varepsilon]_{\varepsilon \rightarrow \infty} = (1 + E_\infty / E) \sigma^*.$$

<sup>1</sup> Подобный случай имеет место, в частности, при растяжении металлов (сплавов). Однако для большинства из них наблюдается изменение структуры в процессе растяжения, о чем свидетельствует изменение размера зерен, видимое на фотографиях микрошлифов. В связи с этим параметр  $\mu_{10}$  не остается постоянным — приходится учитывать его зависимость от деформации (см. [17]).

Предельное значение  $f$  достигается при  $\varepsilon \rightarrow \infty$ , однако практически можно считать, что  $f = f_M$  в момент разрыва при  $\sigma = \sigma_M$  так, что с достаточной степенью приближения:

$$f_M = (1 + E_{\infty}/E) \sigma^* \cong (1 + E_{\infty}/E) \sigma_M - E_{\infty} \varepsilon_M = \sigma_M - E_{\infty} \varepsilon_{вз.м.} \quad (23)$$

(при  $E_{\infty} \rightarrow 0$ ,  $f_M \rightarrow \sigma_M$ ).

Здесь индексом «М» отмечены максимальные величины напряжения и деформации, достигаемые в момент разрыва.

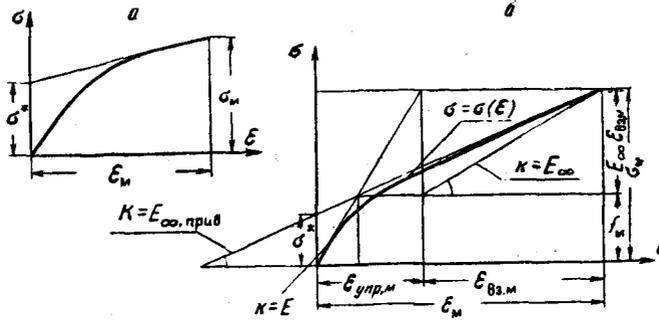


Рис. 14. Диаграммы растяжения при  $v_{\varepsilon} = \text{const}$ , а — характер диаграммы растяжения при  $v_{\varepsilon} = \text{const}$ ; б — графическое определение модуля высокоэластической деформации

Как легко получить чисто геометрически (см. рис. 14, б, где буква  $k$  означает угловой коэффициент), величина  $f_M = (1 + E_{\infty}/E) \sigma^*$  численно равна ординате точки пересечения прямой Гука и асимптоты кривой  $\sigma = \sigma(\varepsilon)$ .

При известной величине приведенного модуля  $E_{\infty, \text{прив}}$ , являющегося угловым коэффициентом асимптоты, модуль высокоэластической деформации легко получить вычислением:

$$E_{\infty} = E_{\infty, \text{прив}} / (1 - E_{\infty, \text{прив}} / E). \quad (24)$$

Но для этой же цели можно использовать простое построение, указанное на фиг. 14, б, которое следует из (23).

Значение  $\sigma^*$  можно определить, либо проводя касательную к экспериментальной кривой растяжения до пересечения с осью ординат, либо вычислением на основании (23) по известным  $\sigma_M$ ,  $\varepsilon_M$ . Подставляя (23) в (21), приходим к следующему соотношению:

$$\frac{v_{\varepsilon}}{1 + E_{\infty}/E} = \frac{(1 + E_{\infty}/E) \sigma^*}{\eta_{20}} e^{a_1 (1 + E_{\infty}/E) \sigma^*}. \quad (25)$$

В том случае, [когда  $E_{\infty} \rightarrow 0$ , величина  $\sigma^*$  совпадает с величиной максимального напряжения  $\sigma_M$ , а соотношение (25) с (11).

В рассматриваемом случае при  $v_{\varepsilon} = \text{const}$  в полулогарифмических координатах можно получить диаграмму  $\sigma = f(\ln v_{\varepsilon})$ , совпадающую с диаграммой для случая  $\sigma = \text{const}$ , соответствующей формуле (19). Для этого, как ясно из (25), по оси ординат вместо  $\sigma$  следует откладывать величину  $f_M = (1 + E_{\infty}/E) \sigma^*$ , а по оси абсцисс вместо  $\ln v_{\varepsilon}$  величину  $\ln [v_{\varepsilon} / (1 + E_{\infty}/E)]$ .

Данные испытаний пленок БФ-4 при различной постоянной скорости в настоящий момент отсутствуют. Имеются лишь диаграммы растяжения большого числа образцов (см. табл. 1), полученные практически при

одной скорости деформации ( $v_\varepsilon \cong 0,30 \cdot 10^{-2} \text{ мин}^{-1}$ ). Обработка 138 диаграмм дала следующие средние значения:

$$f_m = (1 + E_\infty / E) \sigma^* \cong 4 \text{ кг/мм}^2, E_\infty \cong 300 \text{ кг/мм}^2.$$

Необходимо, однако, отметить значительный разброс в величинах модуля высокоэластической деформации, которые колеблются в разных образцах от 34 до 1290 кг/мм<sup>2</sup>. Сейчас трудно сказать, является ли столь значительный разброс следствием недостаточной стандартности в изготовлении образцов, их неполной полимеризации или особенностью растяжения полимеров, при которой, как показал Регель [18], появляется большое число микротрещин, макроскопически приводящих к снижению жесткости образца. Так или иначе, но разброс в величинах  $E_\infty$  оказался значительно большим, чем в величине модуля упругости и предела прочности (см. табл. 1), что следует иметь в виду в дальнейшем.

На рис. 11 нанесена точка с координатами, отвечающими указанным выше средним значениям  $f_m$ ,  $E_\infty$  и  $E$  по табл. 1 ( $f_m = 4 \text{ кг/мм}^2$ ,  $E_\infty / E = 1,07$ ), она расположилась вблизи прямой, проведенной ранее по данным испытаний при  $\sigma = \text{const}$ , что можно рассматривать как подтверждение справедливости формулы (25).

Теоретическая кривая  $\sigma = \sigma(\varepsilon)$  может быть вычислена по уравнению (18) на основании найденных средних значений  $\eta_{20}$ ,  $a_2$  и  $E_\infty$ .

Однако учитывая значительный разброс в характеристиках отдельных пленок, предпочтительнее исключить  $\eta_{20}$ , что можно сделать, используя (25). Тогда дифференциальное уравнение диаграммы растяжения примет вид:

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = E \left\{ 1 - \frac{\varphi}{1 + E_\infty / E} \exp[-a_2 f_m (1 - \varphi)] \right\}, \quad (26)$$

Здесь для сокращения записи обозначено:

$$\varphi = \frac{f(\sigma, \varepsilon)}{f_m} = \frac{(1 + E_\infty / E) \sigma - E_\infty \varepsilon}{(1 + E_\infty / E) \sigma^*} = \frac{\sigma}{\sigma^*} - \frac{E_\infty, \text{прив}}{\sigma^*} \varepsilon.$$

При этом  $0 \leq \varphi \leq 1$ ,  $f_m$  по формуле (23).

На рис. 4 для двух образцов, обладающих различными величинами модулей  $E_\infty$ , приведено сравнение экспериментальных данных с теоретическими кривыми, полученными путем численного интегрирования уравнения (26). При этом для  $a_2$  принималось среднее значение, найденное ранее ( $a_2 = 2,80 \text{ мм}^2 / \text{кг}$ ), а для остальных параметров ( $E$ ,  $E_\infty$  и  $f_m$ ) — значения, определявшиеся непосредственно по результатам испытаний данных образцов ( $E_\infty = 109$  и  $385 \text{ кг/мм}^2$ ,  $f_m 3,64$  и  $3,10 \text{ кг/мм}^2$ ).

В обоих случаях экспериментальные точки удовлетворительно совпадают с теоретической кривой, что свидетельствует о применимости уравнения (26) для построения диаграммы растяжения с постоянной скоростью.

### Выводы

Результаты испытаний пленок БФ-4 показали:

1. Прочность пленок при растяжении практически не зависит от толщины, по крайней мере, для пленок толще 3 м. При скорости деформации 0,25 — 0,40% мин<sup>-1</sup>, среднее значение  $\sigma_{\text{макс}} = 4,4 \text{ кг/мм}^2$ .

2. Модуль упругости пленок практически также не зависит от их толщины. Его среднее значение  $E = 280 \text{ кг/мм}^2$ .

3. При температуре 20—25° деформации пленок почти полностью обратимы, они складываются из упругих и высокоэластических (упругого последействия); в то же время остаточные деформации ничтожно малы.

4. Обобщенное уравнение Максвелла, дополненное с учетом упругого последействия, дающее функциональную связь между деформацией, напряжением и временем, может применяться для исследования деформации пленок. Совпадение экспериментальных и теоретических результатов, в случае чистого упругого последействия, растяжения при  $\sigma = \text{const}$  и при  $v_e = \text{const}$ , оказалось вполне удовлетворительным.

5. При постоянной температуре (20—25°) указанное уравнение в случае пренебрежения остаточной деформацией содержит четыре постоянные: модуль упругости  $E$ , модуль высокоэластической деформации  $E_\infty$ , логарифмический модуль скорости деформации  $m_2 = 1/a_2$  и коэффициент начальной вязкости  $\eta_{20}$ . Средние значения для пленок БФ-4:  $E_\infty \cong 300 \text{ кг/мм}^2$ ,  $a_2 \cong 3 \text{ кг/мм}^2$ ,  $\eta_{20} \cong 10^9 \text{ кг} \cdot \text{мин/мм}^2$ . Однако для отдельных пленок отклонения в значениях этих величин от средних могут быть весьма значительными.

6. Для всесторонней характеристики материала типа БФ наиболее рациональным является испытание нескольких параллельных образцов при постоянной скорости относительной деформации и серии образцов при 3—4 различных величинах постоянного напряжения. Каждый из образцов, испытанных при  $v_e = \text{const}$ , позволяет определить предел прочности, максимальное удлинение ( $\sigma_m$ ,  $\epsilon_m$ ) и два из указанных выше параметров ( $E$ ,  $E_\infty$ ). Два других параметра ( $a_2$ ,  $\eta_{20}$ ) определяются по результатам испытаний при  $\sigma = \text{const}$ . Последние могут быть заменены испытаниями при нескольких значениях постоянной скорости относительной деформации, отличающихся друг от друга хотя бы на порядок.

В заключение автор выражает глубокую признательность Г. И. Гуревичу, а также Ю. С. Лазуркину за участие в обсуждении результатов.

Лаборатория анизотропных структур  
АН СССР

Поступила в редакцию  
17 III 1959 |

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. Буров, М. Классен-Неклюдова, Г. Андреевская и др. Ж. техн. физ., 15, 407, 1945.
2. А. К. Буров, Г. Д. Андреевская, Синтетические волокнистые анизотропные структуры. Изд. АН СССР, 1952.
3. А. К. Буров, Г. Д. Андреевская, Стекловолокнистые анизотропные материалы и их техническое применение. Изд. АН СССР, 1956.
4. А. П. Александров, С. Н. Журков, Явление хрупкого разрыва, ГТТИ, 1933.
5. М. С. Асланова, Волокно, нити и ткани из стекла, Гизлегпром, 1945.
6. Г. М. Бартнев, А. Н. Бовкуненко. Ж. физ. хим., 29, 508, 1955.
7. Т. А. Конторова, Ж. техн. физ., 15, 436, 1945.
8. П. В. Козлов, Б. Н. Коростылев, Ж. физ. химии, 31, 653, 1957; В. Е. Котина, Коллоидн. ж., 13, 444, 1958.
9. Ю. С. Лазуркин, Р. Л. Фогельсон, Ж. техн. физ., 21, 267, 1951.
10. Э. И. Барг, Технология синтетических пластических масс, Госхимиздат, 1954.
11. Т. Алфрей, Механические свойства высокополимеров. Изд. ин. лит., 1952.
12. Усталость высокополимеров. Обзоры и переводы. ГНТИ, Хим. литература, 1957.
13. Г. И. Гуревич, Ж. техн. физ., 17, 1491, 1947.
14. Г. И. Гуревич, Труды ИФЗ АН СССР 1959, 169.
15. Таблицы интегральной показательной функции. Изд. АН СССР, 1954.
16. И. М. Рыжик, Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений, ГИТТЛ, 1948.
17. А. Л. Рабинович, М. Г. Штарков, Е. И. Дмитриева, Труды МФТИ, № 3, 1959.
18. В. Р. Регель. Ж. техн. физ., 26, 359, 1956.
19. И. Ф. Канавец, Л. Г. Баталова, Докл. АН СССР, 114, 1053, 1957.
20. П. П. Кобенко, Е. В. Кувшинский, Г. И. Гуревич, Изв. АН СССР, отд. хим. н., 1937, 329.
21. Я. И. Френкель, Ю. Ф. Образцов, ЖЭТФ, 9, 1081, 1939.
22. Г. А. Слонимский, Ж. техн. физ., 9, 179, 1939.
23. Г. Гуревич, П. Кобеко, Ж. техн. физ., 9, 1267, 1939.

**SOME MECHANICAL PROPERTIES OF BF-4 POLYMER FILMS***A. L. Rabinovich***S u m m a r y**

In the work the results are presented of elongation tests of BF-4 films from 3 to 160  $\mu$  thick. The dependence of the elasticity modulus and film strength on the thickness was determined experimentally. The strained and stressed states of the films were studied under different conditions of stretch, namely, constant stretch velocity, constant stress and in the case of after-effects. A comparison has been made between the experimental data and the analytical expressions derived from the generalized Maxwell equation with account of elastic after-effects. The possibility has been examined of an analytic description of various conditions of isothermal uniaxial stretch on the basis of the above equation only, containing four constants. It is intended to use the characteristics of BF-4 resulting from the study to develop a rational procedure for determining the mechanical properties of other polymers of this type and also for an approximate theoretical analysis of the deformations of vitreous plastics.