

Т. Т. АРАКЕЛЯН

ДОЛГОВЕЧНОСТЬ И ПОЛЗУЧЕСТЬ ВОЛОКНА ЕРАНИТ

Рассматривается долговечность и ползучесть нового синтетического волокна еранит (винол-М), полученного простой технологией в Ереванской лаборатории полимеризационных процессов под руководством А. Е. Акопяна [1].

Для волокна еранит обычным способом были получены следующие средние значения основных физико-механических характеристик.

Таблица 1

№№ п/п	Вид характеристики	Размерность	Численное значение
1	Метрический номер	м/г	3704
2	Толщина в тексах	г/км	0.27
3	Разрывная нагрузка	г	8.10
4	Разрывная длина	км	30.5
5	Относительное полное разрывное удлинение	%	27.0
6	Начальный модуль нормальной упругости	кг/см ²	15000
7	Абсолютная работа разрыва	гсм	4.76
8	Удельная работа разрыва	кг см/г	359
9	Удельный вес [1]	г/см ³	1.28
10	Усадка в кипяченой воде [1]	%	3.40

1. *О структуре волокна.* Волокно еранит представляет одномерно-упорядоченную структурную систему, устойчивую при обычных температурах. Центральные слабо прозрачные участки поперечных срезов волокна (фиг. 1, увеличение в 480 раз) заняты малоупорядоченными образованиями молекул-глобул. Периферия занята поликристаллическими агрегатами молекул вытянутой конформации (ориентационная рубашка) со сложной надмолекулярной структурой.

Механические свойства волокна проявляются на уровне этой надмолекулярной организации [2].

Известно, что микроскопическими исследованиями установлено наличие в волокне истинно- и псевдокристаллических и аморфных областей. Рентгенографическим спектрографом получены минимальные и максимальные величины кристалличности 0.35 и 0.68 [1].

Площади поперечных срезов волокна по величине до 6 раз отличаются друг от друга (фиг. 1). Различие поперечных сечений по форме и структуре, нецилиндричность и общая неоднородность волокна

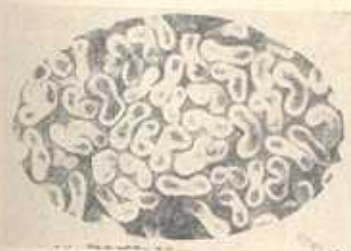
увеличивают разброс результатов испытаний. Для определения площади поперечного сечения волокна используется взвешивание. Несмотря на низкую точность этого способа, применив методы математической статистики к обработке результатов, можно прийти к правильным обобщениям.

2. *Зависимость напряжения от деформации.* Эта зависимость для волокна обусловлена многими факторами, в том числе режимом нагружения и состоянием среды, окружающей образец. При одноосном растяжении фиксировались скорость нарастания деформации и термовлажные условия, близкие к стандартным.

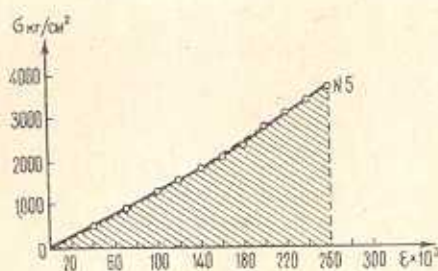
Эксперименты проводились на испытательной машине Ф-01-С (ГДР) с инерционным силоизмерителем. Гидравлический привод машины обеспечивает равномерное нарастание деформации. Время, потребное на разрушение волокна, ограничивалось в среднем 20 секундами.

Волокно деформировалось равномерно, без образования шейки, и поверхность разрыва была нормальна к направлению растяжения.

На фиг. 2 приводится кривая растяжения $\sigma(\varepsilon)$ некоторого образца № 5, обладающего типичными средними характеристиками испытания.



Фиг. 1.



Фиг. 2.

Эта кривая с высокой точностью (пунктирная теоретическая кривая почти сливается с экспериментальной) аппроксимируется нелинейной функцией

$$\sigma(\varepsilon) = E\varepsilon + E_1\varepsilon^2 + E_2\varepsilon^3 \quad \sigma(\varepsilon) \leq \sigma_k \quad (2.1)$$

где ε — деформация волокна, E , E_1 и E_2 — неизвестные параметры, σ_k — предел прочности волокна.

Если обозначить площадь поперечного сечения через F , разрывную деформацию через ε_1 и рабочую длину образца через l , тогда на основе (2.1) абсолютная работа разрыва D для всей растягиваемой длины волокна будет

$$D = Fl \int_0^{\varepsilon_1} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon = Fl \left(\frac{1}{2} E\varepsilon_1^2 + \frac{1}{3} E_1\varepsilon_1^3 + \frac{1}{4} E_2\varepsilon_1^4 \right)$$

По экспериментальной кривой $\sigma(\varepsilon)$ (фиг. 2) и по (2.1) установлены значения параметров E , E_1 и E_2 , вычислены работа разрыва D , удельная работа разрыва D_1 и коэффициент полноты диаграммы растяжения γ_1 [3]

$$D = 4.76 \text{ гсм}, \quad D_1 = \frac{D}{Fl\gamma} = 359 \text{ кгсм/г}, \quad \gamma_1 = \frac{D}{Fl\gamma\sigma(\varepsilon_1)} = 0.45$$

Здесь γ — удельный вес волокна еранит.

Коэффициент γ_1 показывает деформационную способность волокна. Для различных волокон γ_1 изменяется в интервале $0.35 \leq \gamma_1 \leq 0.65$ [4].

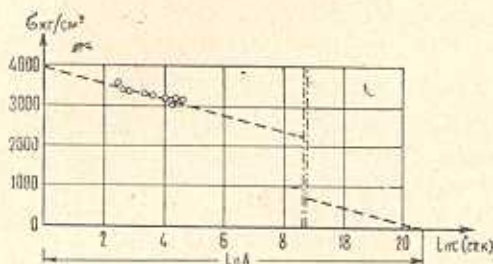
3. *Долговечность волокна.* Долговечность характеризуется временем, протекающим от момента приложения нагрузки до разрушения образца. Количественная зависимость долговечности в виде

$$\tau = A \exp(-\alpha\sigma) \quad (3.1)$$

была дана в работах В. Буссе [5] и Г. Гуревича [6], где τ — долговечность, σ — разрушающее напряжение растяжения, A и α — неизвестные параметры. Более тщательные эксперименты С. Журкова и других [7–9], проведенные для многочисленных материалов, подтвердили справедливость соотношения (3.1).

Долговечность волокна еранит определялась при режиме медленного непрерывного нагружения (растяжения) до разрыва образца, при постоянстве скорости деформации ($\dot{\varepsilon} = \text{const}$) и термовлажных условий. Скорость деформации на испытательной машине Ф-01-С менялась 9 раз. Обычно для волокон графики долговечности строятся пятью или даже тремя точками с меньшей вариацией времени разрыва [10, 11].

Определение параметров A и α сводится к построению графика прямой линии в полулогарифмических координатах. График долговечности волокна еранит построен 10 точками с учетом всей совокупности экспериментальных данных (более 40 испытаний). Из фиг. 3 непо-



Фиг. 3.

средственно следует $A = \exp 20.7 = 5.2 \cdot 10^8 \text{ сек}$. Координаты двух точек графика (фиг. 3) дают $\alpha = \frac{1}{\sigma_1 - \sigma_2} \ln \frac{\tau_2}{\tau_1} = 0.0049 \frac{\text{см}^2}{\text{кг}}$. Следовательно, для долговечности волокна еранит будем иметь

$$\tau = 5 \cdot 10^8 \exp(-0.005\sigma) \quad (3.2)$$

Полученные значения параметров волокна еранит ($A = 5 \cdot 10^8 \text{ сек}$, $\alpha = 0.005 \frac{\text{см}^2}{\text{кг}}$) находятся между значениями соответствующих параметров капрона ($A = 2 \cdot 10^{11} \text{ сек}$, $\alpha = 0.0046 \frac{\text{см}^2}{\text{кг}}$) и пластифицированного поливинилхлорида ($A = 6.3 \cdot 10^7 \text{ сек}$, $\alpha = 0.009 \frac{\text{см}^2}{\text{кг}}$) [12].

Соотношение (3.2) позволяет прогнозировать долговечность волокна еранит.

4. *Подготовка образцов и экспериментальная установка.* После репрезентативной выборки образцы волокна взвешивались и к их концам прикреплялись бумажные прямоугольники для приложения нагрузки. На волокно на расстоянии 100 мм друг от друга наносились 2 капли эмульсии для фиксации рабочей длины.

Испытания проводились на специально сконструированной автором 32-местной установке. Она состоит из рельсового пути, вдоль которого передвигается тележка с катетометром КМ-6 для дистанционного оптического измерения перемещения волокна.

Перемещение вычисляется как разница двух отсчетов катетометра по границам рабочей длины и начальной рабочей длины.

Нагруженный образец волокна помещен в герметической камере со стеклянной стенкой, в верхней части которой устроено вертикальное осевое отверстие, через которое под давлением можно вводить агрессивные газы или воздух с различной влажностью и температурой.

5. *Ползучесть волокна.* Деформация волокна еранит как полимерного материала состоит из упруго-мгновенной, высокоэластической и пластической частей. Для отделения упруго-мгновенной деформации от остальных, после 60-минутного пребывания волокна в растянутом состоянии оно разгружается. При этом измеряются совершенные волокном обратные деформации, упруго-мгновенная и упругое последствие [13].

Напряжение волокна ограничено значением $\sigma \leq 0.5 \sigma_k$, в силу чего в начальные моменты времени практически появляются только упруго-мгновенные и высокоэластические деформации.

Обычно кривые ползучести полимеров рассматриваются с реологической позиции на основе уравнения Максвелла и принципа наложения Больцмана. Однако материал волокна еранит в процессе ползучести находится со средой в химически равновесном состоянии и физического старения практически не происходит. В силу этого, для описания явления ползучести волокна еранит используется модифицированное выражение линейной ползучести Н. Х. Арутюняна [14] для материалов зрелого возраста следующего вида:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon(t, T) = B\sigma [1 - \exp[-\gamma(t - T)]] \quad (5.1)$$

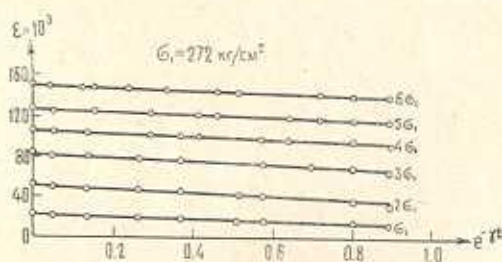
где B и γ — неизвестные параметры. Начало отсчета времени t принимается с момента приложения нагрузки, этим (5.1) отличается от исходного. При этом уже условный возраст T является неизвестным параметром отрицательного знака.

Без вычисления значений параметров B , γ и T можно проверить пригодность соотношения (5.1) для описания ползучести волокна еранит и этим доказать справедливость вышеупомянутых предположений. Для этого, преобразуя (5.1), имеем

$$\varepsilon(t) = A_1 + B_1 \exp(-\gamma t) \quad (5.2)$$

где $A_1 = B\varepsilon$, $B_1 = B\varepsilon \exp(\gamma T)$.

При $\sigma = \text{const}$ (5.2) представит уравнение прямой линии с текущими координатами $\exp(-\gamma t)$ и $\varepsilon(t)$. Если между экспериментальными значениями t и $\varepsilon(t)$ существует зависимость типа (5.2), то между $\exp(-\gamma t)$ и $\varepsilon(t)$ при фиксированном γ должна существовать прямолинейная зависимость. Действительно, при нанесении опытных точек на координатную сетку с осями $\exp(-\gamma t)$ и $\varepsilon(t)$, они настолько точно лежат на указанной прямой (фиг. 4), что нет надобности количественной оценки расхождений. Этим доказывается достаточная точность представления процесса простой ползучести волокна еранит соотношением (5.1).



Фиг. 4.

Незначительные отклонения опытных точек при малых значениях времени от точек теоретической прямой (фиг. 4) отчасти объясняются близостью порядка начальных перемещений волокна к погрешности катетометра КМ-6.

Для вычисления вероятнейших значений параметров B , γ и t на экспериментальной кривой ползучести (фиг. 5) берутся 4 точки с координатами (ε_1, t_1) , (ε_2, t_2) , (ε_3, t_3) и (ε_4, t_4) , расположенными так, чтобы выполнялись условия

$$t_2 - t_1 = t_4 - t_3 \quad \text{и} \quad t_4 > t_3 > t_2 > t_1 \quad (5.3)$$

Тогда из системы трансцендентных уравнений, написанной для каждого нагружения $\sigma = \text{const}$,

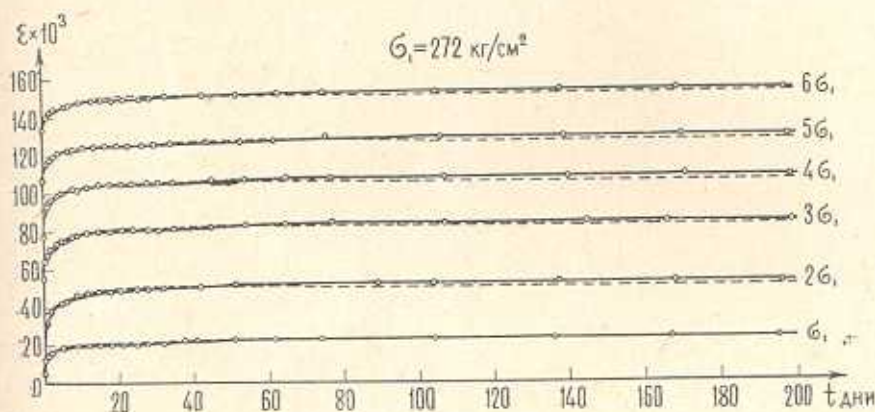
$$\varepsilon(t_i) = B\varepsilon \{1 - \exp[-\gamma(t_i - T)]\}, \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (5.4)$$

и из условия (5.3) искомые значения параметров будут

$$B = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_4 - \varepsilon_2 \varepsilon_3}{\sigma (\varepsilon_1 + \varepsilon_4 - \varepsilon_2 - \varepsilon_3)}, \quad \gamma = \frac{1}{t_2 - t_1} \ln \left(\frac{B\sigma - \varepsilon_1}{B\sigma - \varepsilon_2} \right)$$

$$T = t_1 + \frac{1}{\gamma} \ln \left(\frac{B\sigma - \varepsilon_1}{B\sigma} \right)$$

Равноточные прямые измерения t и $\varepsilon(t)$, а также достаточная точность представления ползучести волокна функцией (5.1) практически обеспечивают совместность уравнений системы (5.4).



Фиг. 5.

По вычисленным значениям параметров были построены теоретические кривые ползучести (пунктирные линии фиг. 5). Кривые простой ползучести ($\sigma = \text{const}$) не могут полностью выявить характер функции ползучести. Основная функция ползучести должна обеспечить определение закона изменения деформаций по заданному закону нагружения, и наоборот [15].

Для различных напряжений $\sigma_1 \leq \sigma \leq 6\sigma_1 \leq 0.5 \sigma_k$ значения параметров B , γ и T мало отличаются от своих средних значений, как это видно из фиг. 6. Коэффициент вариации параметра T меньше, чем коэффициент вариации предела прочности волокна еранит σ_k .

Таким образом, исходя из средних значений параметров ползучести (фиг. 6), получим окончательное выражение ползучести волокна еранит

$$\varepsilon(t) = 9.3 \cdot 10^{-5} \sigma [1 - 0.15 (-0.11 t)] \quad (5.5)$$

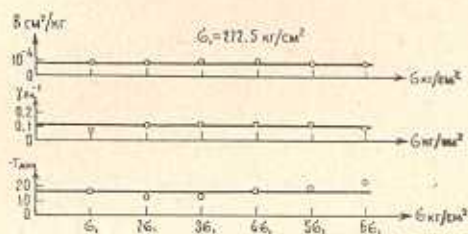
В отличие от наследственной теории ползучести, из (5.5) следует, что $\varepsilon(0) \neq 0$, поскольку в начальный момент нагружения возникает не только упруго-мгновенная, но и мгновенная высокоэластическая деформация. Существование последней (в течение первых 30 сек) явно вытекает из графиков ползучести (фиг. 4,5). При $t=0$ из (5.5) получается значение мгновенной высокоэластической деформации

$$\varepsilon(0) = B\sigma [1 - \exp(-\gamma T)] = 7.9 \cdot 10^{-5} \sigma$$

Для максимального значения деформации ползучести при $t \rightarrow \infty$ имеем

$$\varepsilon(\infty) = B\sigma = 9.3 \cdot 10^{-5} \sigma$$

При этом $\frac{\varepsilon(\infty) - \varepsilon(0)}{\varepsilon(\infty)} 100 = 15\%$. Следовательно, важной особенностью ползучести волокна еранит является большое значение мгновенной эластической деформации. Другой особенностью деформации ползучести, вытекающей из (5.2), является инвариантность относительно начала отсчета времени.



Фиг. 6.

Для более наглядного представления механической сущности деформации ползучести волокна еранит рассмотрена линейная трехэлементная модель этого явления [16], которая состоит из двух пружин жесткостью k_1 и k_2 и ньютоновского вязкого элемента с вязкостью η . Применяв к этой модели закон упругости Гука и закон вязкости Ньютона, получим следующее соотношение ползучести [11]:

$$\varepsilon(t) = \frac{E}{lk_2} \left\{ 1 - \frac{k_1}{k_1 + k_2} \exp \left[- \frac{k_1 k_2}{\eta (k_1 + k_2)} t \right] \right\} \quad (5.6)$$

Как следует из (5.17) и (5.6), параметры ползучести волокна будут выражаться через характеристики модели следующим образом:

$$B = \frac{E}{lk_2}, \quad \gamma = \frac{k_1 k_2}{\eta (k_1 + k_2)}, \quad T = \frac{\eta (k_1 + k_2)}{k_1 k_2} \ln \left(\frac{k_1}{k_1 + k_2} \right)$$

Важными результатами механического исследования волокна еранит являются следующие.

1. Волокно еранит обладает большой мгновенной высокоэластической деформацией, которая хотя возникает мгновенно, но затухает весьма медленно.
2. Ползучесть волокна еранит, как высокоориентированного полимера, достаточно точно описывается модифицированной функцией ползучести Н. Х. Арутюняна.
3. Особенностью деформации ползучести волокна еранит является инвариантность относительно начала отсчета времени.

В проведении экспериментов и в обработке результатов принимала участие И. А. Домбаева.

Институт математики и механики

АН Армянской ССР

Поступила 15 IV 1967

Ք. Տ. ԱՌԱՔԵԼՅԱՆ

ԵՐԱՆԻՏ ՄԱՆՐԱԹԵԼԻ ԵՐԿԱՐԱԿԵՑՈՒԹՅՈՒՆԸ ԵՎ ՍՈՂՔԸ

Ա մ փ ո փ ու լ մ

Ուսումնասիրվում է պոլիմիլինիլ սպիրտի հիման վրա ստացված, նոր սինթետիկ մանրաթելի՝ երանիտի, մեխանիկական հատկությունները:

Ֆիկսացված սեփմի, հաստատուն ջերմաստիճանի և խոնավության պայմաններում, որոշված են մանրաթելի սովորական մեխանիկական բնորոշիչները, լարման և դեֆորմացիայի կախվածության անալիտիկ արտահայտությունը (2.4): Վերջինիս հիման վրա, հաշվված է դեֆորմացիայի աշխատանքը:

Բերված է՝ մանրաթելի ստատիկական հոգնածությունը բնորոշող առնչությունը (3.2), որը հնարավորություն է տալիս կանխատեսելու նրա երկարակեցությունը:

Երանիտ մանրաթելի սողքի փորձարկումները կատարվել են՝ հեղինակի կողմից նախագծված, հատուկ սարքի միջոցով: Յույց է տրված, որ երանիտ մանրաթելի սողքը, որպես բարձր օրինաացիայի ենթարկված պոլիմերի, բավարար ճշտությամբ նկարագրվում է Ն. Խ. Հարությունյանի մոդիֆիկացված գծային սողքի ֆունկցիայով (5.5):

T. T. ARAKELIAN

LONGEVITY AND CREEP OF FIBRE YERANIT

S u m m a r y

The mechanical properties of the new synthetic fibre Yeranit are investigated.

The static tiredness of elementary fibre Yeranit is presented by the relation of W. Byssé and G. Gurevich.

The creep of fibre Yeranit is described quite exactly by the modified function of creep of N. Kh. Arutyunian.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Акопян А. Е. Синтетическое волокно на основе поливинилового спирта. Армгосиздат, Ереван, 1961.
2. Карпин В. А., Слонимский Г. А. Краткие очерки по физико-химии полимеров. Изд. 2-ое, М., 1967.
3. Кукин Г. Н. Современные методы испытания текстильных материалов. ЦИИТИЛП, М., 1961.
4. Кукин Г. Н., Соловьев А. Н. Текстильное материаловедение, ч. II. Изд. „Легкая индустрия“, М., 1964.
5. Busse W., Lessing E., Loughborough D., Larrick L. I. Appl. Phys. 13, 715 (1942).
6. Гуревич Г. И. Ж. техн. физики, 17, 1491, 1947.
7. Жуков С. Н., Нарзулаев Б. Н. Ж. техн. физики, 23, вып. 10, 1677, 1953.
8. Жуков С. Н., Томашевский Э. Е. Ж. техн. физики, 25, вып. 1, 66, 1955.

9. Некоторые проблемы прочности твердого тела. Сб. статей, посвященный восьмидесятилетию академика АН Укр.ССР Н. Н. Давиденкова. Изд. АН СССР, М.—Л., 1959.
10. *Бартева Г. М., Зуев Ю. С.* Прочность и разрушение высокоэластических материалов. Изд. „Химия“, М.—Л., 1964.
11. Усталость высокополимеров. Обзоры и переводы. Госнаучтехиздат хим. лит., М., 1957.
12. *Гуль В. Е., Кулезнев В. Н.* Структура и механические свойства полимеров. Изд. „Высшая школа“, М., 1966.
13. *Ферри Дж.* Вязкоупругие свойства полимеров, ИЛ, М., 1963.
14. *Арутюнян Н. Х.* Некоторые вопросы теории ползучести. Гостехиздат, М., 1952.
15. *Вульфсон С. В.* Некоторые вопросы теории ползучести (ЦНИКС). Диссертация, М., 1964.
16. Упругость и неупругость металлов. Сб., ИЛ, М., 1954.