

## Применение принципа температурно-временной аналогии для описания вязкоупругих свойств полиэтилентерефталатных магнитных лент

Э. С. Уманский, В. В. Крючков, Н. С. Шидловский (Киев)

Широкое использование в различных областях техники магнитных лент на полиэтилентерефталатной (ПТФ) основе выдвинуло ряд задач, решение которых позволяет значительно улучшить качество записываемой и воспроизводимой информации и повышает надежность аппаратуры магнитной записи (АМЗ). К таким задачам следует отнести создание модели, описывающей реологичность механических свойств магнитных лент в широком температурном интервале. Как известно [1], эксплуатационный диапазон температур для многих АМЗ составляет  $-60 \dots +80^\circ\text{C}$ . При этом участки магнитной ленты, находящиеся в тракте АМЗ, подвергаются воз-

действию долговременных статических и динамических нагрузок, что может привести к накоплению значительных деформаций и, следовательно, к искажению записанной информации.

В связи с этим возникает задача надежного прогнозирования процессов ползучести и релаксации магнитных лент в указанных эксплуатационных температурно-временных интервалах.

В предыдущих сообщениях [2—4] приведены результаты экспериментально-теоретических исследований, посвященных определению реологических параметров магнитных лент на ПТФ-основе. Применение принципа температурно-временной аналогии (ТВА) [5—7] позволяет в зна-

чительной степени обобщить имеющиеся к настоящему времени обширные данные и упростить методику инженерных расчетов при оценке накапливаемых во времени деформаций магнитных лент при работе в различных устройствах.

Указанный принцип ТВА может быть также применен при прогнозировании деформационных свойств магнитных лент на основании экспресс-испытаний, проводимых в условиях повышенных температур.

Известно, что магнитные ленты в основном эксплуатируются в виде кольцевых рулонов, намотанных на жесткий сердечник. Релаксационные процессы, протекающие в теле намотки, вызывают перераспределение и уменьшение остаточных радиальных сжимающих напряжений, ответственных за целостность рулона, и в ряде случаев могут привести к его разрушению [4, 8, 9]. Особенно заметны указанные процессы в условиях повышенных температур. Необходимость прогнозирования прочностных качеств рулонов полимерных магнитных лент приводит к соответствующей краевой задаче термовязкоупругости, решение которой без применения принципа ТВА становится весьма затруднительным.

Эксперименты, связанные с определением функции ползучести  $J(t)$  и модуля релаксации напряжений  $E(t)$  в диапазоне температур  $-60...+80^\circ\text{C}$ , проводили на специальных стендах.

Кривые ползучести получали на двенадцатиточечном испытательном стенде [2], созданном специально для исследования ползучести пленочных полимерных материалов.

В интервале времени  $0,1...30$  с запись диаграммы ползучести производили с помощью шлейфового осциллографа Н-700, дальнейшие изменения длины образца фиксировали индикаторами часового типа ИЧ-10.

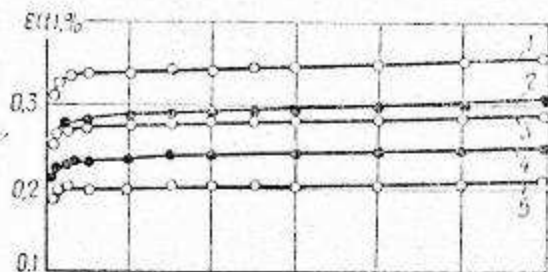
Точность автоматического поддержания температуры в термокамере  $\pm 1^\circ\text{C}$ .

На рис. 1 показаны типичные кривые ползучести некоторых типов магнитных лент при различных температурах.

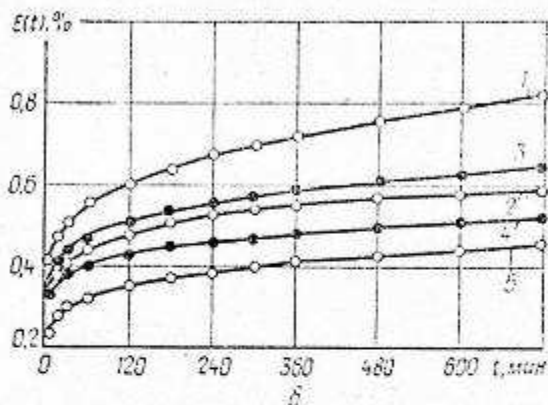
Образцы магнитных лент испытывали при постоянных нагрузках 1; 1,5; 2; 2,5; 3 Н и температурах 20, 40, 60,  $80^\circ\text{C}$  в течение 48 ч. При этом напряжение в образцах не превысило  $\sigma_{\text{max}} = 0,13\sigma_{\text{н}}$ , что соответствует интервалу напряжений, не выходящих за область линейной ползучести представленных типов магнитных лент. Указанная область была определена с помощью предварительных экспериментов и построения изохронных кривых ползучести.

Экспериментальные кривые релаксации напряжений в магнитных лентах получены при использовании нагружающей и измерительной систем прецизионной испытательной установки для исследования кратковременной прочности и деформативности полимерных пленок [10].

Запись кривых релаксации напряжений в условиях повышенных температур осуществлялась

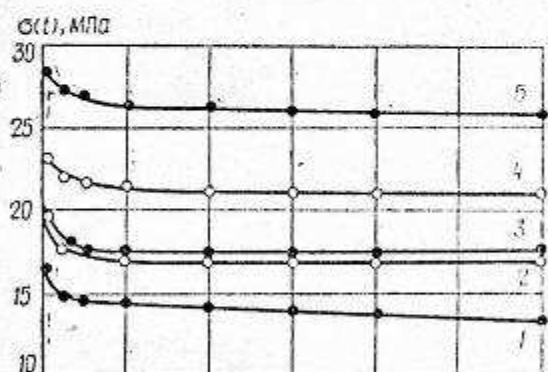


a

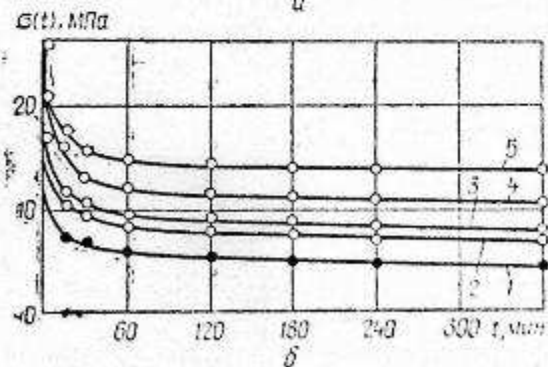


b

Рис. 1. Кривые ползучести различных типов магнитных лент для напряжения  $\sigma = 10$  МПа при температурах  $20^\circ\text{C}$  (a) и  $60^\circ\text{C}$  (б): 1 — И-4404-6; 2 — PE-31; 3 — Pyral-HP4H; 4 — A-4409-6; 5 — И-4406-6.



a



b

Рис. 2. Кривые релаксации напряжений в различных типах магнитных лент при деформации  $\epsilon = 0,5\%$  в условиях температур  $20^\circ\text{C}$  (a) и  $60^\circ\text{C}$  (б): 1 — И-4404-6; 2 — PE-31; 3 — Pyral-HP4H; 4 — A-4409-6; 5 — И-4406-6.

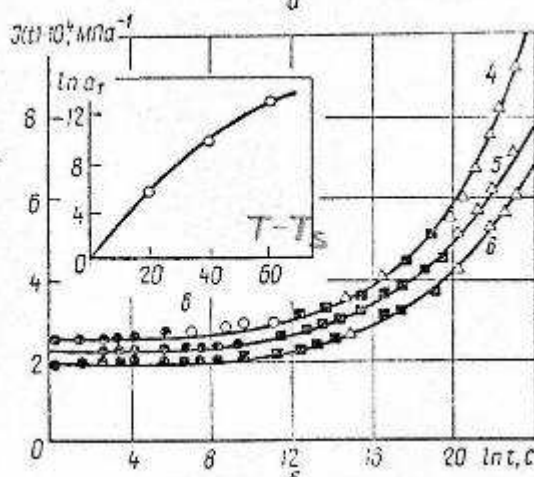
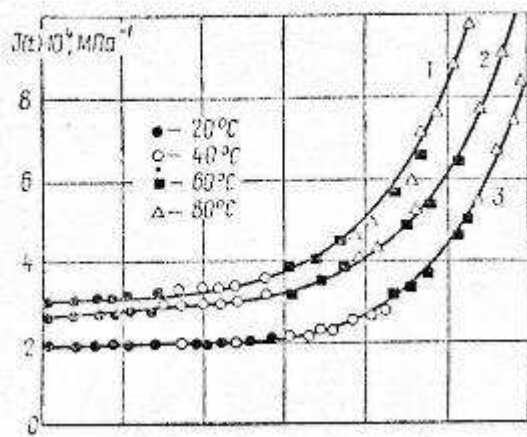


Рис. 3. Обобщенные кривые податливости магнитных лент (а, б) и функция температурно-временного сдвига (в): 1 — И-4404-6; 2 — Pyral, Pyral-HP4H; 3 — И-4406-6; 4 — PE-31, Scotch-768; 5 — А-4409-6; 6 — И-4212-6.

при помощи самопишущего потенциометра КСП-4М, подключенного непосредственно к кольцевому динамометру, используемому в качестве силовизмерительного элемента. Сравнительно высокая скорость перемещения диаграммной ленты (до 54 м/с) позволила получить достаточно качественную запись начального участка кривой релаксации изученных типов магнитных лент (рис. 2).

Нагружение образца производили с максимально возможной скоростью перемещения подвижного захвата, а именно 500 мм/мин, что при длине испытываемых образцов  $l=100$  мм составляет  $\dot{\epsilon}=0,08$  с<sup>-1</sup>.

В связи с некоторым дрейфом нуля, особенно проявляющимся при испытаниях в условиях повышенных температур, временной интервал ограничили 6...8 часами.

Мгновенные модули упругости  $E_0$  определяли резонансным методом при продольных колебаниях образцов с присоединенной добавочной массой [11, 12].

Испытания проводили при нормальной температуре в диапазоне частот 30...100 Гц.

Таблица 1

Геометрические параметры, динамические модули упругости, прочность и деформативность магнитных лент на ПТФ-основе

Тип магнитной ленты	Размеры			Механические характеристики		
	Ширина, мм	Общая толщина, мм	Толщина основы, мм	$E_{дин}$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\epsilon_{max}$ , %
И-4406-6	6,25	0,037	0,022	5300	205	70
И-4212-6	6,25	0,018	0,013	5720	202	56
И-4404-6	6,25	0,034	0,024	3350	206	62
А-4409-6	6,25	0,033	0,024	4700	202	88
PE-31	25,4	0,030	0,020	4000	193	66
Pyra L	25,4	0,034	0,024	3850	129	106
Pyra L-HP4H	6,25	0,033	0,023	3950	157	120
Scotch-768	6,25	0,049	0,035	4280	156	120

Испытаниям на ползучесть и релаксацию напряжений был подвергнут ряд наиболее широко применяемых отечественных и зарубежных типов магнитных лент.

В табл. 1 представлены данные о геометрических параметрах, мгновенных модулях упругости ( $E_{дин}$ ), а также пределе прочности  $\sigma_b$  и максимальном относительном удлинении  $\epsilon_{max}$  образцов указанных магнитных лент.

Возможность применения принципа ТВА к исследуемому классу материалов в указанном диапазоне температур и напряжений проверяли по обычной методике [5] путем измерения величин сдвигов соответствующих экспериментальных кривых податливостей и кривых модулей релаксации, полученных при различных фиксированных температурах. Таким образом, подтверждены следующие зависимости, имеющие силу для термореологически простых материалов:

$$\tilde{J}(t, T) = J(\xi); \quad \tilde{E}(t, T) = E(\xi), \quad (1)$$

где  $\tilde{J}$  — функция податливости;  $\tilde{E}$  — функция релаксации;  $J$  — функция податливости при температуре приведения  $T_0$ ;  $E$  — функция релаксации при температуре приведения  $T_0$ ;  $\xi = t \cdot a_T(T)$  — приведенное время;  $a_T(T)$  — температурная функция сдвига.

Опытные значения функции сдвига сопоставляли с известным соотношением Вильямса — Ландела — Ферри

$$\ln a_T = \frac{a(T - T_0)}{b + (T - T_0)}, \quad (2)$$

где  $a, b$  — экспериментально определяемые параметры.

Обобщенные кривые ползучести и релаксации напряжений в образцах магнитных лент строили на основе методики, изложенной в [5], по экспериментально полученным при фиксированных температурах кривым ползучести и релаксации,



часть из которых показана на рис. 1, 2. Указанные кривые воспроизвели в координатах

$$J(t) = \varepsilon(t)/\sigma_0 \propto \ln t; \quad E(t) = \sigma(t)/\varepsilon_0 \propto \ln t,$$

где  $\sigma_0$  — постоянное напряжение, поддерживаемое в образце при испытании на ползучесть;  $\varepsilon_0$  — постоянная деформация, поддерживаемая в образце при изучении релаксации.

После соответствующего сдвига графиков функций ползучести и релаксации получены обобщенные кривые податливости (рис. 3) и модуля релаксации (рис. 4), причем температура приведения  $T_0$  принята равной 20 °С. Значения определенных в этом случае параметров функции температурно-временного сдвига приведены в табл. 2, а усредненная зависимость  $a_T$  от температуры — на рис. 3, в.

Как видно, применение метода ТВА позволяет кривые податливости и модуля релаксации напряжений для исследуемого класса материалов в указанном диапазоне температур, напряжений и деформаций преобразовать в единую для каждого типа магнитной ленты обобщенную кривую и существенно расширить временной интервал ползучести и релаксации напряжений.

Отметим, что значения констант, входящих в выражение для функции температурно-временного сдвига (2), для всех типов исследованных магнитных лент весьма мало отличаются друг от друга, поэтому естественно для изученного класса магнитных лент на ПТФ-основе принять для расчетов усредненные величины  $a_{ср}$  и  $b_{ср}$  (см. табл. 2).

Как отмечалось выше, предварительные эксперименты показали, что область напряжений от  $\sigma = 0,02\sigma_n$  до  $\sigma = 0,13\sigma_n$ , в которой проводились настоящие экспериментальные исследования, является линейной областью вязкоупругости.

Поэтому в качестве основного соотношения между деформациями и напряжениями можно использовать линейное интегральное наследственное уравнение, которое в случае одномерного напряженного состояния при  $\sigma_0 = \text{const}$  имеет вид

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_0} \left[ 1 + \int_0^t K(t-\tau) d\tau \right]. \quad (3)$$

Принимая ядро уравнения (3) в виде дробно-экспоненциальных функций Ю. Н. Работнова [13] и используя аппроксимацию М. И. Розовского [14], уравнение ползучести при  $T = \text{const}$  запишем следующим образом:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_0} \left\{ 1 + \frac{\omega_0}{\omega_\infty} [1 - \exp(-\omega_\infty \lambda^\lambda t^\lambda)] \right\}, \quad (4)$$

где  $\lambda$ ,  $\omega_0$ ,  $\omega_\infty$  — экспериментально определяемые параметры.

Введение обобщенного времени  $\xi = t \cdot a_T(T)$  позволяет использовать уравнение (4) для ап-

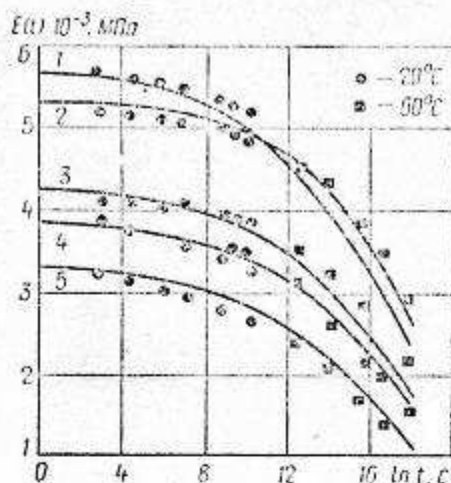


Рис. 4. Обобщенные кривые модуля релаксации напряжений магнитных лент: 1 — И-4406-6; 2 — И-4212-6; 3 — Scotch-768; 4 — Pyral, Pyral-HP4H, PE-31; 5 — И-4404-6.

проксимации обобщенных кривых ползучести. При этом уравнение ползучести представим в виде

$$J(t, T) = \frac{1}{E_0} \left\{ 1 + \frac{\omega_0}{\omega_\infty} [1 - \exp(-\omega_\infty \lambda^\lambda \xi^\lambda)] \right\}. \quad (5)$$

Параметры  $\omega_0$ ,  $\omega_\infty$  и  $\lambda$ , входящие в уравнения (4), (5), подобраны методом наименьших квадратов, а мгновенное значение модуля упругости  $E_0$  определено ранее упомянутым динамическим способом. Значения указанных параметров приведены в табл. 2, аппроксимирующие кривые ползучести показаны на рис. 3.

Значения среднеквадратических относительных ошибок  $\Phi$  для аппроксимирующих кривых податливости различных типов магнитных лент представлены в табл. 2.

При разработке некоторых типов аппаратов магнитной записи важно располагать данными о модулях релаксации напряжений при постоянной деформации.

Таблица 2  
Параметры функции температурно-временного сдвига и коэффициенты уравнений (4), (5) для различных типов магнитных лент

Тип магнитной ленты	$a$	$b, ^\circ\text{C}$	$J_0 \cdot 10^4, \text{МПа}^{-1}$	$\omega_0 \cdot 10^2$	$\omega_\infty \cdot 10^2$	$\lambda$	$\Phi, \%$
И-4406-6	45,8	146,7	1,89	0,50	0,65	0,30	3,27
И-4212-6	46,9	149,6	1,75	1,87	3,86	0,24	5,68
И-4404-6	44,8	148,7	2,98	1,76	0,71	0,25	5,05
А-4409-6	43,3	141,5	2,13	1,90	4,86	0,24	7,81
PE-31	45,4	149,1	2,50	1,36	1,13	0,25	3,33
Pyral	44,8	140,0	2,60	1,38	1,20	0,25	4,51
Pyral-HP4H	45,1	142,8	2,53	1,44	1,16	0,25	3,86
Scotch-768	46,3	148,4	2,34	1,46	0,98	0,25	6,39
Средние значения	45,3	145,9					

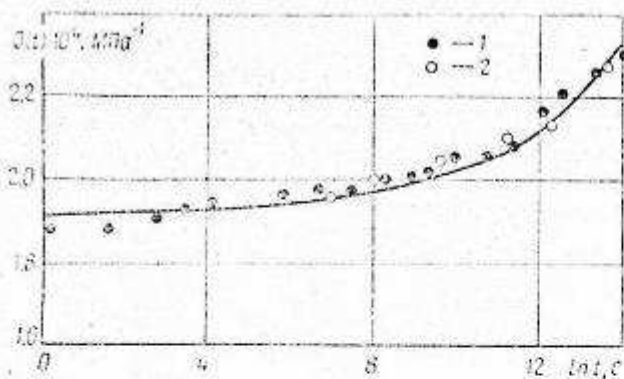


Рис. 5. Кривая податливости при длительном испытании магнитной ленты И-4406-6 на ползучесть: 1 — длительный эксперимент; 2 — кратковременный эксперимент при  $T = 60^\circ\text{C}$ . (Линия — аналитический расчет.)

Поскольку экспериментальное исследование релаксации напряжений более сложно, чем построение кривых ползучести, определим функцию модуля релаксации напряжений по измеренной функции податливости  $J(t)$ .

Выражение для модуля релаксации напряжений, полученное с использованием указанной выше аппроксимации [13, 14], имеет следующий вид:

$$E(t, T) = E_0 \left\{ 1 - \frac{\epsilon_0}{\omega} [1 - \exp(-\omega \lambda^2 \xi^2)] \right\}, \quad (6)$$

где  $\omega = \omega_0 + \omega_\infty$ .

На рис. 4 изображены обобщенные кривые модулей релаксации напряжений, полученные по формуле (6), причем для построения кривых релаксации использовали значения  $\omega_0$ ,  $\omega_\infty$  и  $\lambda$ , полученные при обработке кривых ползучести (см. табл. 2). Видно, что соотношение (6) вполне пригодно для практических расчетов релаксационных процессов в условиях одноосного растяжения для исследуемого класса материалов. Относительная среднеквадратическая ошибка при этом не превышает 10 %.

Ряд методов решения краевых задач линейной термовязкоупругости использует представление ядер соответствующих интегральных уравнений

в виде суммы эрмитов с отрицательными показателями (обобщенная модель Максвелла).

Методом наименьших квадратов произведен подбор элементов указанной модели, применяемой для описания обобщенных кривых релаксации напряжений указанного класса материалов. Установлено, что максимальная относительная ошибка аппроксимации не превышает 8,7 %, если количество элементов модели ограничено тремя. Увеличение числа элементов указанной модели до четырех снижает максимальную относительную ошибку до 4 %.

В табл. 3 представлены значения экспериментально определяемых параметров  $E_i$  и  $\tau_i$ , входящих в уравнение, которое отображает закон релаксации напряжений, полученный на основе обобщенной модели Максвелла:

$$\sigma(\xi) = \epsilon_0 \sum_{i=1}^N E_i \exp(-\xi/\tau_i), \quad (7)$$

где  $\epsilon_0$  — постоянная деформация;  $\xi$  — приведенное время.

Построение с помощью принципа температурно-временной аналогии обобщенных кривых ползучести и релаксации с последующей аппроксимацией указанных кривых подходящими функциями позволяет достаточно надежно прогнозировать ползучесть и релаксацию магнитных лент по результатам сравнительно кратковременных экспериментов, произведенных при повышенных температурах. Тем самым удается расширить временной диапазон на 5...6 и более десятичных порядков.

На рис. 5 показана кривая ползучести магнитной ленты М-4406-6, построенная с использованием указанной выше методики. Там же точками отмечены результаты длительных контрольных экспериментов, проведенных при постоянном напряжении  $\sigma_0 = 8,6$  МПа.

Отметим, что поскольку максимальная относительная ошибка не превышает 5 %, данный метод с достаточной для практических целей точностью можно применять в инженерных расчетах.

Таблица 3

Значения параметров уравнения (7), определенные для различных типов магнитных лент

Тип магнитной ленты	$E_1$ , МПа	$E_2$ , МПа	$E_3$ , МПа	$E_4$ , МПа	$\tau_1 \cdot 10^{-3}$ , с	$\tau_2 \cdot 10^{-5}$ , с	$\tau_3 \cdot 10^{-7}$ , с	$\tau_4 \cdot 10^{-9}$ , с
И-4406-6	152	621	1729	2777	0,249	0,874	0,999	0,890
И-4212-6	627	1395	1893	1670	2,490	7,490	7,978	0,889
И-4404-6	373	771	838	1283	3,671	9,609	5,820	7,930
А-4409-6	452	386	1252	2498	2,495	5,005	9,995	9,995
PE-31	191	561	1049	2145	0,312	0,625	0,664	0,336
Pyral	383	871	988	1523	5,010	9,365	5,322	0,632
Pyral-HP411	410	947	1481	1020	6,260	9,980	8,604	0,853
Scotch 768	410	820	1602	1367	2,481	5,020	6,738	0,936

## Summary

Based on experimental data on creep and relaxation under uniaxial tension, obtained by the authors in a range temperatures from 20 to 80°C and stresses up to  $0.13\sigma_0$ , using the temperature-time analogy principle, viscoelastic properties are described for eight types of magnetic tapes on polyethyleneterephthalate base. This permitted transforming the creep and stress relaxation curves for the studied class of materials in the mentioned temperature and stress ranges into a single generalized curve and essentially enlarging the time interval of creep and stress relaxation. Direct experiments have shown reliability of such a prediction of viscoelastic properties for magnetic tapes. A possibility is also shown for a satisfactory description of viscoelastic properties of the mentioned materials based on linear integral hereditary equations with a kernel as Yu. N. Rabotnov's exponential-fractional function.

1. *Травников Е. Н.* Механизмы аппаратуры магнитной записи. — Киев: Техника, 1976.—476 с.
2. *Стенд* для исследования ползучести и длительной прочности композиционных пленок типа магнитных носителей при повышенных температурах / Э. С. Уманский, В. В. Крючков, И. Е. Дебрянный и др. — Пробл. прочности, 1973, № 5, с. 103—107.
3. *Уманский Э. С., Крючков В. В., Веремчук С. С.* Ползучесть и восстановление композиционных пленок при повышенных температурах. — Там же, № 7, с. 111—115.
4. *Уманский Э. С., Крючков В. В., Шидловский Н. С.* Исходящая способность рулонизируемых полимерных пленок. — Там же, 1980, № 10, с. 104—113.

5. *Ферри Дж.* Вязкоупругие свойства полимеров. — М.: Изд-во иностр. лит., 1963.—535 с.
6. *Уржумцев Ю. С.* Температурно-временная аналогия. — Механика полимеров, 1975, № 1, с. 66—83.
7. *Кристенсен Р.* Введение в теорию вязкоупругости. — М.: Мир, 1974.—338 с.
8. *Влияние температурного фактора на величину радиальных напряжений в рулоне магнитной ленты* / Э. С. Уманский, В. В. Крючков, В. С. Тимошенко и др. — Техника средств связи. Сер. ОТ, 1978, вып. 2, с. 88—94.
9. *Уманский Э. С., Крючков В. В., Шидловский Н. С.* Оценка влияния температурного фактора на исходящую способность рулона магнитной ленты. — Пробл. прочности, 1981, № 8, с. 62—65.
10. *Уманский Э. С., Дебрянный И. Е., Крючков В. В.* Исследование прочности и деформируемости тонких композиционных материалов типа магнитных носителей. Сообщ. I. Прочность и деформируемость при повышенных температурах. — Там же, 1972, № 5, с. 40—45.
11. *Исследование динамических характеристик магнитных лент и их основ при продольных колебаниях* / Э. С. Уманский, В. В. Крючков, Н. С. Шидловский и др. — Техника средств связи. Сер. ОТ, 1977, вып. 2, с. 74—80.
12. *Уманский Э. С., Крючков В. В., Шидловский Н. С.* Исследование демпфирующей способности магнитных лент и их основ при продольных колебаниях. — В кн.: Рассеяние энергии при колебаниях механических систем. Киев: Наук. думка, 1980, с. 310—314.
13. *Работнов Ю. Н.* Ползучесть элементов конструкций. — М.: Наука, 1966.—560 с.
14. *Розовский М. И.* О некоторых особенностях уругонаследственных сред. — Изв. АН СССР. Механика и машиностроение, 1961, № 2, с. 30—36.

Киевский политехнический институт

Поступила в редакцию 17.05.82 г.