

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
“Тихоокеанский государственный университет”

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛА ПОЛЗУЧЕСТИ ВЯЗКОУПРУГИХ МАТЕРИАЛОВ**

Методические указания

к выполнению лабораторной работы  
по курсу «Сопротивление материалов»  
для студентов всех технических  
специальностей

Хабаровск  
Издательство ТОГУ  
2009

УДК 539.376.434:678.027.7:620.179.1(088)

Определение предела ползучести вязкоупругих материалов : методические указания к выполнению лабораторной работы по курсу «Сопротивление материалов» для студентов всех технических специальностей / сост. О. А. Одинокова. – Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2009. - 29 с.

Методические указания составлены на кафедре механики деформируемого твердого тела. В них рассмотрены методы исследования физико-механических свойств вязкоупругих материалов, в основном полимерных, с учетом особенностей их строения. Изложены нетрадиционные способы определения характеристик ползучести высокополимеров, приводится описание необходимой экспериментальной базы. Рекомендуется для проведения учебно-исследовательской работы студентов.

Печатается в соответствии с решениями кафедры механики деформируемого твердого тела и методического совета института архитектуры и строительства

© Тихоокеанский государственный университет, 2009

## ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Полимеры относятся к вязкоупругим материалам, для которых зависимость между напряжениями и деформациями включает время. Характерными для таких материалов являются их релаксационные свойства, а также существенное влияние режимов (скоростей) нагружения на диаграммы  $\sigma$ - $\varepsilon$ ,  $\sigma$ - $t$ ,  $\varepsilon$ - $t$ .

Сложность строения и, как следствие, сложность механического поведения полимеров затрудняют прогноз состояния полимерной конструкции в процессе ее длительной эксплуатации. Актуальным остается вопрос целесообразности применения пластмасс в той или иной конструкции и анализа отдаленных результатов ее эксплуатации с тем, чтобы не снизить безопасность использования готового изделия.

Механические свойства полимеров не могут быть всесторонне описаны методами исследования и испытаний, принятыми для мономеров, так как пластмассы имеют более широкий спектр механических и физико-химических свойств вследствие длинноцепочечного строения молекул.

Многие полимеры не вписываются в рамки требований, предусмотренных стандартами и нормами на испытания не только металлов и других традиционных материалов, но и отдельных типов полимеров. Так ГОСТ 4651-82 (Пластмассы. Методы испытания на сжатие) не распространяется на газонаполненные пластмассы. ГОСТ 25.602-80, трактующий методы испытания на сжатие композитов (кроме стеклопластиков, испытание которых подпадает под требования ГОСТ 4651-82), определяет предел прочности армированных полимеров. Но газонаполненный волокнисто-пористый полимерный материал не испытывает видимого разрушения даже при очень больших напряжениях.

Специфические условия эксплуатации полимеров, их целевое использование в конструкциях различного назначения требуют новых, нестандартных методов исследования их механического поведения.

Методические указания включают комплекс вопросов исследования физико-механического состояния вязкоупругих (в частности полимерных) материалов, предусмотренных всеми учебными планами по курсу “Сопротивление материалов” всех специальностей в разделе “Экспериментальное изучение механических свойств материалов и основы выбора допускаемых напряжений”.

*Цель лабораторной работы* – ознакомить с особенностями механического поведения вязкоупругих материалов, в частности полимерных.

*Задача лабораторной работы* – определение предела ползучести вязкоупругого материала.

### **ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛЗУЧЕСТИ ВЯЗКОУПРУГИХ МАТЕРИАЛОВ**

Для большинства вязкоупругих материалов, работающих в жестких силовых конструкциях, склонность к нарастающим со временем деформациям становится наиболее важным фактором, определяющим эксплуатационные показатели. В таких случаях величина расчетных напряжений лимитируется деформационными свойствами полимера.

Так, известный по ГОСТ 3248-81 [1] способ определяет предел ползучести материала  $\sigma_0$  в зависимости от эксплуатационных характеристик конструкции: необходимого времени действия нагрузки  $t_0$  и величины предельно допустимой деформации  $\varepsilon_0$  или скорости ползучести  $\dot{\varepsilon}_0$ . ГОСТ 18197-84 [2] содержит аналогичное определение условной (деформационной) долговременной прочности. Определенный таким образом предел ползучести носит конструктивный характер, аналогичен условию жесткости и не может отразить механического состояния самого материала на момент достижения  $\sigma_0$ , так как в установленных указанными ГОСТами ограничениях материал может претерпевать опасные с точки зрения прочности изменения.

Предел ползучести по ГОСТ 3248-81 получают на основе испытаний материала на ползучесть при растяжении (рис. 1, 2). Но в практике эксплуатации конструкций обращает на себя внимание тот факт, что деформируемость одного и того же материала под воздействием растягивающих и равных им сжимающих усилий не одинакова. Вероятно, во всех телах процесс сжатия происходит не идентично процессу растяжения, хотя проявляется это для отдельных материалов в разной степени.

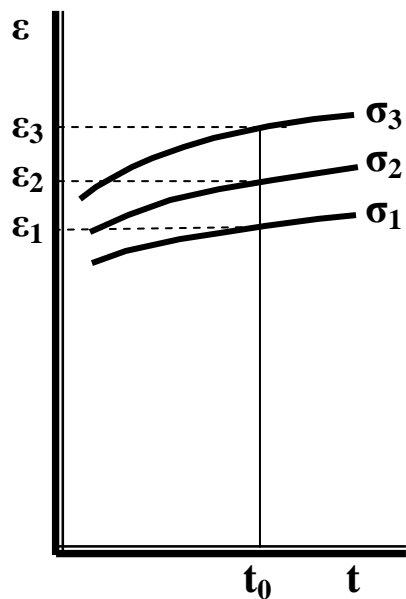


Рис. 1. Кривые ползучести вязкоупругого материала при растяжении

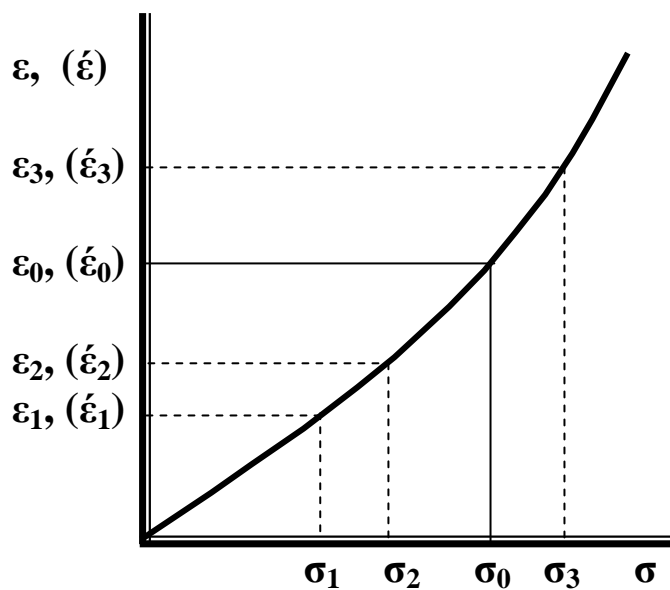


Рис. 2. К определению предела ползучести по ГОСТ 3248-81

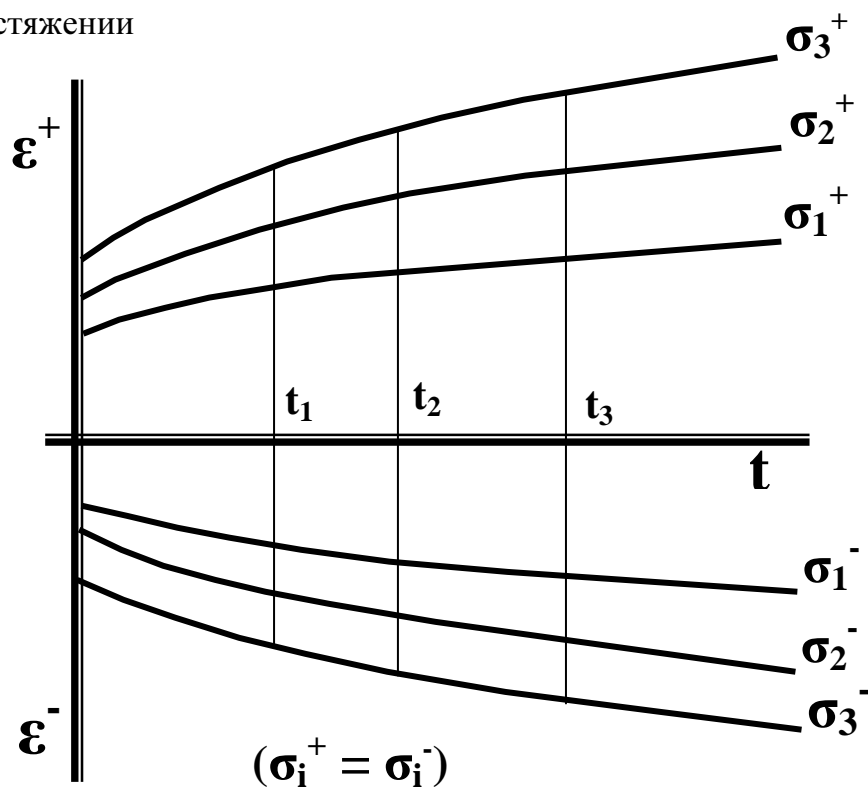


Рис. 3. Кривые ползучести при растяжении и сжатии образцов вязкоупругого материала

Для большинства традиционных материалов при сравнительно небольших деформациях можно приближенно считать диаграммы растяжения и сжатия совпадающими. Однако в полимерных материалах сжимающие или растягивающие напряжения по-разному отражаются на межмолекулярных взаимодействиях, определяющих деформационные свойства полимера, поэтому механические характеристики при растяжении и сжатии для них различны как по численным значениям, так и по физическому смыслу. Это различие усиливается с ростом напряжения. Однако ГОСТа на определение предела ползучести материалов при сжатии нет.

На основе исследования деформационных свойств полимерных материалов при растяжении и сжатии разработан метод определения предела ползучести, который выявляет предельное состояние вязкоупругого материала с точки зрения его прочности [3]. Экспериментальное исследование такого рода сопряжено с большими трудностями, так как, рассматривая малые деформации, необходимо обеспечить высокую чистоту опыта, чтобы в погрешности сравнительных испытаний не потерять различие свойств материала при воздействии на него растягивающих или сжимающих напряжений.

В рамках теории старения на основе изохронных кривых, введенных Ю. Н. Работновым [4], получен критерий оценки несущей способности вязкоупругого материала. При этом изохронные кривые строят в координатах не  $\sigma$ - $\varepsilon$ , как требуют ГОСТ 3248-81 и 18197-84, а в полуотносительных координатах  $\sigma$ - $(\frac{\varepsilon^+}{\varepsilon^-})$ , где отношение

$$\left| \frac{\varepsilon^+}{\varepsilon^-} \right| = \frac{E^-}{E^+} = R, \quad (1)$$

при этом  $\sigma^+ = -\sigma^-$ . В выражении (1) R является функцией разномодульности, с введением которой стало возможно на ранней стадии действия нагрузки выявить потерю несущей способности материала.  $E^-$  и  $E^+$  – длительные модули (модули ползучести) при сжатии и растяжении.

Для проверки состояния материала в исследуемом диапазоне времени t, температур T и напряжений  $\sigma$  необходимо провести испытания на ползучесть как при растяжении, так и при сжатии (рис. 3), по результатам которых определяется эмпирическая зависимость

$$R=f(\sigma, T, t). \quad (2)$$

Аппроксимацию функции разномодульности рекомендуется произвести на основе метода наименьших квадратов. Выражение для искомой функции  $F(\sigma, T, t)$  задаем в виде

$$F(\sigma, T, t) = \sum_{k=0}^b A_k \cdot \varphi_k(\sigma, T, t), \quad (3)$$

где  $A_k$  – неизвестные параметры, подлежащие определению;  $\varphi_k(\sigma, T, t)$  – система линейно независимых функций, удовлетворяющая условию полноты.

Задача состоит в том, чтобы найти значения  $A_k$ , соответствующие наиболее вероятным значениям неизвестных параметров, которые будут тем более близки к истинным, чем больше число наблюдений.

Поэтому точность решения повышается с увеличением числа как неизвестных параметров  $A_k$ , так и точек коллокации (узлов интерполяции).

Из условия минимума суммарной квадратичной погрешности получаем систему алгебраических уравнений относительно параметров  $A_k$ :

$$\frac{\partial \Delta^2}{\partial A_k} = 0 \quad (4)$$

Для каждого значения температуры  $T_j$  и времени  $t_j$  функцию разномодульности согласно (3) можно представить в виде

$$F(\sigma) = \sum_{k=0}^m A_k \cdot \sigma^k, \quad (5)$$

где параметры  $A_k$  отражают термовязкоупругие свойства материала. Они могут быть определены из данных эксперимента на ползучесть при одноосном растяжении и сжатии нагрузкой, постоянной во времени. Для изотермического процесса изохронные зависимости  $R=f(\sigma)$  имеют тенденцию к росту с увеличением напряжения, при этом

$$R(0)=1.$$

Условие (4) может быть представлено следующим выражением:

$$\sum_{j=1}^n (R(\sigma_j) - F(\sigma_j)) \frac{\partial F(\sigma_j)}{\partial A_k} = 0, \quad (6)$$

где  $n$  – число точек коллокации (число измерений).

С учетом (5) после несложных преобразований получим

$$\sum_{k=0}^m A_k \sum_{j=1}^n \sigma_j^{k+i} = \sum_{j=1}^n R_j \cdot \sigma_j^i. \quad (7)$$





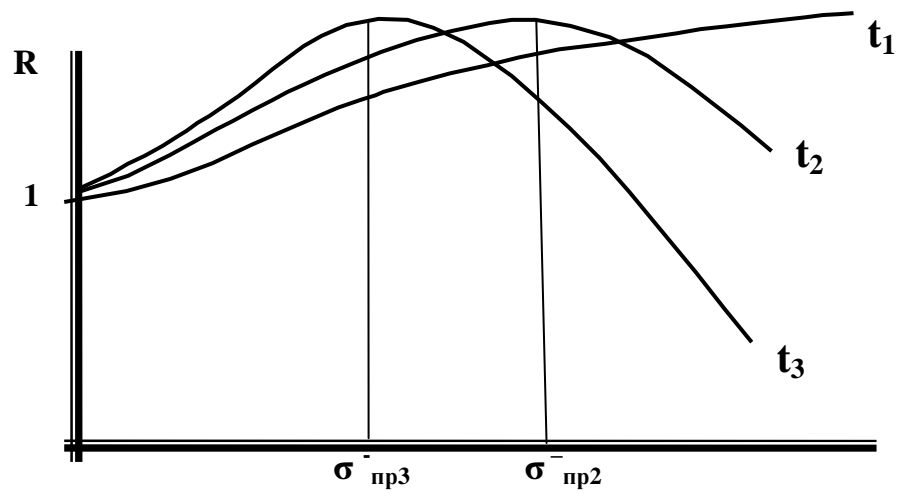


Рис. 4. Предельные напряжения при сжатии образца вязкоупругого материала

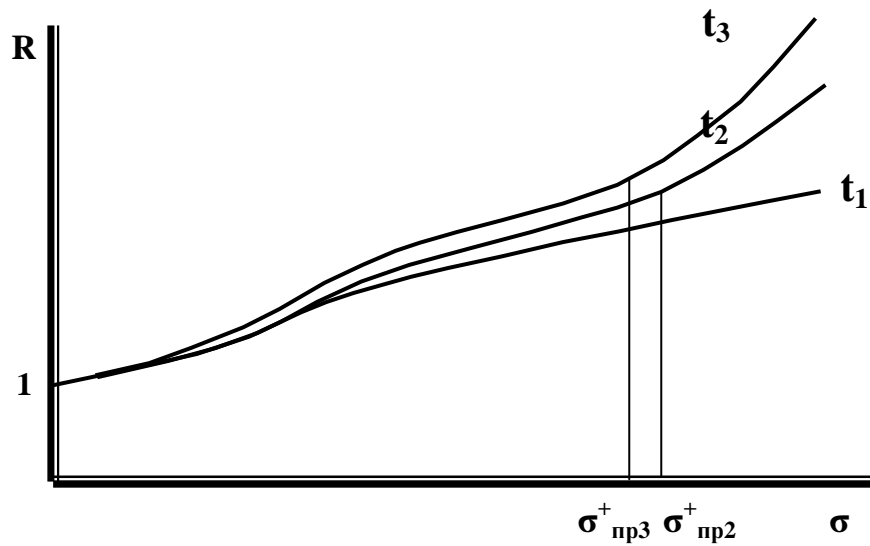


Рис. 5. Предельные напряжения при растяжении образца вязкоупругого материала

Приведенный выше метод его определения основан на результатах испытания материала в условиях ползучести при растяжении и сжатии, поэтому рассмотренный метод не требует экспериментальной проверки.

Следует заметить, что при наличии указанных выше характерных точек на кривой разномодульности  $F(\sigma)$ , кривые ползучести как при растяжении, так и при сжатии носят монотонно возрастающий характер и сами по себе не несут видимых признаков ухудшения механических свойств материала.

Из анализа кривых  $F(\sigma)$  установлено, что с увеличением длительности действия нагрузки максимум, или вторая точка перегиба, смещается в сторону малых значений напряжений, то есть величина предельного напряжения уменьшается.

В общем случае  $\sigma_{пр}$  зависит от температуры и времени действия напряжения и, следовательно, образует поверхность предельных напряжений. Таким образом, метод определения прочностного предела ползучести позволяет диагностировать потерю несущей способности вязкоупругого материала на ранней стадии, когда другие методы не в состоянии это сделать.

Следует заметить, что прочностной и жесткостной пределы ползучести не противоречат, а дополняют друг друга. Опасное напряжение  $\sigma_{оп}$  можно определить, задавшись расчетным временем нагрузки  $t_0$  и величиной деформации  $\varepsilon_0$ . Меньшее из значений  $\sigma_0$  (по ГОСТ 3248-81) или  $\sigma_{пр}$  следует принять за опасное напряжение.

## **ПРИМЕР ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЧНОСТНОГО КРИТЕРИЯ ПОЛЗУЧЕСТИ**

Проведены испытания цилиндрических образцов капролона ( $\varnothing 12 \times 120$  мм), армированного стеклотканью (КСТ), вырезанных по направлению основы. Наибольшее напряжение опыта  $\sigma_{max} = 53,1$  МПа, которое принято за  $\sigma_0$ . Испытание образцов производилось в растяжной машине рычажного типа, позволяющей производить нагружение постоянным напряжением. Смена режимов нагружения с растяжения на сжатие осуществлялась при помощи реверсора [5]. Результаты испытаний для  $t=0,25$  мин. сведены в табл. 1.

Таблица 1

## Результаты механических испытаний армированного капролона

Деформационные характеристики	Напряжения, МПа					
	8,85	17,7	26,55	35,4	44,25	53,1
$\varepsilon^-, \%$	0,07930	0,16790	0,2596	0,3737	0,467	0,561
$\varepsilon^+, \%$	0,08712	0,18831	0,3130	0,4300	0,4932	0,552
R	1,0986	1,1216	1,2057	1,1506	1,0560	0,9840

Таблица 2

## Определение коэффициентов для системы алгебраических уравнений (армированный капролон)

Коэффициенты	Точки коллокации (число измерений), t=0,25мин, T=293 К							$\sum_{j=1}^7$
	$1 \leq j \leq n$							
	1	2	3	4	5	6	7	
$\sigma_j$ , МПа	0	8,85	17,7	26,55	35,4	44,25	53,1	$1,859 \cdot 10^2$
$\sigma_j^2$	0	$7,832 \cdot 10^1$	$3,133 \cdot 10^2$	$7,049 \cdot 10^2$	$1,253 \cdot 10^3$	$1,958 \cdot 10^3$	$2,820 \cdot 10^3$	$7,127 \cdot 10^3$
$\sigma_j^3$	0	$6,932 \cdot 10^2$	$5,545 \cdot 10^3$	$1,872 \cdot 10^4$	$4,436 \cdot 10^4$	$8,664 \cdot 10^4$	$1,497 \cdot 10^5$	$3,057 \cdot 10^5$
$\sigma_j^4$	0	$6,134 \cdot 10^3$	$9,815 \cdot 10^4$	$4,969 \cdot 10^5$	$1,570 \cdot 10^6$	$3,834 \cdot 10^6$	$7,950 \cdot 10^6$	$1,396 \cdot 10^7$
$\sigma_j^5$	0	$5,429 \cdot 10^4$	$1,737 \cdot 10^6$	$1,319 \cdot 10^7$	$5,559 \cdot 10^7$	$1,696 \cdot 10^8$	$4,222 \cdot 10^8$	$6,624 \cdot 10^8$
$\sigma_j^6$	0	$4,805 \cdot 10^5$	$3,075 \cdot 10^7$	$3,503 \cdot 10^8$	$1,968 \cdot 10^9$	$7,507 \cdot 10^9$	$2,242 \cdot 10^{10}$	$3,228 \cdot 10^{10}$
$\sigma_j^7$	0	$4,252 \cdot 10^6$	$5,433 \cdot 10^8$	$9,299 \cdot 10^9$	$6,967 \cdot 10^{10}$	$3,322 \cdot 10^{11}$	$1,190 \cdot 10^{12}$	$1,602 \cdot 10^{12}$
$\sigma_j^8$	0	$3,763 \cdot 10^7$	$9,634 \cdot 10^9$	$2,469 \cdot 10^{11}$	$2,466 \cdot 10^{12}$	$1,470 \cdot 10^{13}$	$6,321 \cdot 10^{13}$	$8,063 \cdot 10^{13}$
$R_j$	1	1,0986	1,1216	1,2057	1,1506	1,0560	0,9840	7,617
$R_j \sigma_j$	0	9,7226	19,852	32,011	40,731	46,728	52,250	201,295
$R_j \sigma_j^2$	0	$8,605 \cdot 10^1$	$3,514 \cdot 10^2$	$8,499 \cdot 10^2$	$1,442 \cdot 10^3$	$2,068 \cdot 10^3$	$2,774 \cdot 10^3$	$7,571 \cdot 10^3$
$R_j \sigma_j^3$	0	$7,615 \cdot 10^2$	$6,220 \cdot 10^3$	$2,257 \cdot 10^4$	$5,104 \cdot 10^4$	$9,150 \cdot 10^4$	$1,473 \cdot 10^5$	$3,194 \cdot 10^5$
$R_j \sigma_j^4$	0	$6,739 \cdot 10^3$	$1,101 \cdot 10^5$	$5,991 \cdot 10^5$	$1,807 \cdot 10^6$	$4,049 \cdot 10^6$	$7,823 \cdot 10^6$	$1,439 \cdot 10^7$

$F(\sigma_j)$	1,031	1,0774	1,1243	1,1572	1,1475	1,0839	0,9566	-
---------------	-------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	---

Каждый образец испытывался в условиях постоянной температуры (293 К) на растяжение и сжатие, начиная с минимальной нагрузки 1 кН, что соответствовало напряжению  $\sigma=8,85$  МПа, длительность испытания - 64 мин.

В качестве аппроксимирующего уравнения принят пятипараметрический многочлен четвертого порядка:

$$F(\sigma) = A_0 + A_1 \sigma + A_2 \sigma^2 + A_3 \sigma^3 + A_4 \sigma^4.$$

При этом  $k=5$ ,  $m=4$ , а число точек коллокации  $n=7$ .

Результаты расчета согласно (7), представленные в табл. 2, позволили составить систему уравнений

$$M \times A = V,$$

то есть

$$\begin{bmatrix} 7 & 1,859 \times 10^2 & 7,127 \times 10^3 & 3,057 \times 10^5 & 1,396 \times 10^7 \\ 1,859 \times 10^2 & 7,127 \times 10^3 & 3,057 \times 10^5 & 1,396 \times 10^7 & 6,624 \times 10^8 \\ 7,127 \times 10^3 & 3,057 \times 10^5 & 1,396 \times 10^7 & 6,624 \times 10^8 & 3,228 \times 10^{10} \\ 3,057 \times 10^5 & 1,396 \times 10^7 & 6,624 \times 10^8 & 3,228 \times 10^{10} & 1,602 \times 10^{12} \\ 1,396 \times 10^7 & 6,624 \times 10^8 & 3,228 \times 10^{10} & 1,602 \times 10^{12} & 8,063 \times 10^{13} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} A_0 \\ A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 7,617 \\ 2,01 \times 10^2 \\ 7,571 \times 10^3 \\ 3,194 \times 10^5 \\ 1,439 \times 10^7 \end{bmatrix}.$$

Решение этой системы дает следующие результаты:

- параметры функции разномодульности равны:

$$A = \begin{bmatrix} 1,031 \\ 0,004 \\ 2,035 \cdot 10^{-4} \\ -7,448 \cdot 10^{-6} \\ 3,201 \cdot 10^{-8} \end{bmatrix};$$

- функция разномодульности принимает вид

$$F(\sigma) = 1,031 + 0,004 \sigma + 2,035 \cdot 10^{-4} \sigma^2 - 7,448 \cdot 10^{-6} \sigma^3 + 3,201 \cdot 10^{-8} \sigma^4.$$

Исследуем  $F$  на экстремум и точки перегиба. Равенство нулю первой производной:

$$F'(\sigma) = 0,004 + 4,07 \cdot 10^{-4} \sigma - 2,234 \cdot 10^{-5} \sigma^2 + 1,280 \cdot 10^{-7} \sigma^3 = 0$$

определит предел ползучести при сжатии. Корни этого уравнения равны:

$$\sigma_1 = -7,017 \text{ МПа}, \quad \sigma_2 = 29,237 \text{ МПа} \text{ и } \sigma_3 = 152,288 \text{ МПа}.$$

Первый отрицательный корень не может определять предельное напряжение как не имеющий смысла. Третий корень должен быть отброшен, так как  $\sigma_3 > \sigma_0 = 53,1$  МПа. Второй корень уравнения  $F'(\sigma) = 0$  положителен и меньше, чем  $\sigma_0$ . С переходом напряжения через значение 29,237 МПа  $F'$  меняет знак с положительного на отрицательный. При  $\sigma = 26$  МПа  $F' = +1,73 \cdot 10^{-3}$ , а при  $\sigma = 32$  МПа  $F' = -1,658 \cdot 10^{-3}$ .

Вторая производная дает уравнение:

$$F'' = 4,07 \cdot 10^{-4} - 44,688 \cdot 10^{-6} \sigma + 38,412 \cdot 10^{-8} \sigma^2 = 0,$$

корни которого равны:  $\sigma_1 = 9,96$  МПа,  $\sigma_2 = 106,378$  МПа.

Первый положительный корень отражает естественный ход функции разномодульности, а второй – превышает  $\sigma_0$ , поэтому ни один из них не может быть принят за опасное напряжение.

Таблица 3

**Определение коэффициентов вектора  $V_1$  ( $T = 293\text{К}$ ,  $t = 8$  мин)  
(армированный капролон)**

Коэффициенты	Точки коллокации $1 \leq j \leq n$							$\sum_{n=1}^7$
	1	2	3	4	5	6	7	
$\sigma_j$ , МПа	0	8,85	17,7	26,55	35,4	44,25	53,1	$1,859 \cdot 10^2$
$R_j$	1	1,122	1,210	1,206	1,020	0,800	0,625	6,983
$R_j \sigma_j$	0	9,9297	21,417	32,019	36,108	35,400	33,188	168,06
$R_j \sigma_j^2$	0	87,878	379,081	850,11	$1,278 \cdot 10^3$	$1,566 \cdot 10^3$	$1,762 \cdot 10^3$	$5,923 \cdot 10^3$
$R_j \sigma_j^3$	0	777,72	$6,71 \cdot 10^3$	$2,257 \cdot 10^4$	$4,525 \cdot 10^4$	$6,932 \cdot 10^4$	$9,358 \cdot 10^4$	$2,382 \cdot 10^5$
$R_j \sigma_j^4$	0	6882,81	$1,188 \cdot 10^5$	$5,992 \cdot 10^5$	$1,602 \cdot 10^6$	$3,067 \cdot 10^6$	$4,969 \cdot 10^6$	$1,036 \cdot 10^7$
$F(\sigma_j)$	0,972	1,1472	1,231	1,1823	1,0139	0,7897	0,6261	-

Следовательно, при сжатии опасным должно быть принято напряжение, равное  $\sigma_{оп} = \sigma_{пр.с} = 29,237$  МПа, как наименьшее из значений  $\sigma_0$  и  $\sigma_{пр.с}$ . При растяжении за опасное напряжение может быть принято  $\sigma_{оп} = \sigma_0 = 53,1$  МПа.

При увеличении времени действия напряжения до 8 мин величина опасного напряжения уменьшается до 1,982 МПа, при этом матрица М останется без изменения, а составляющие вектора  $V_1$  подсчитаны в табл. 3.

Вектор свободных членов уравнений

$$V_1 = \begin{bmatrix} 6,983 \\ 168,06 \\ 5,923 \cdot 10^3 \\ 2,382 \cdot 10^5 \\ 1.036 \cdot 10^7 \end{bmatrix}.$$

Решение системы алгебраических уравнений  $M \times A = V_1$  дает вектор параметров функции разномодульности А:

$$A = \begin{bmatrix} 0,972 \\ 0,022 \\ -2,421 \cdot 10^{-5} \\ -2,847 \cdot 10^{-5} \\ 3,543 \cdot 10^{-7} \end{bmatrix}.$$

Функция разномодульности и ее производные принимают вид:

$$F(\sigma) = 0,972 + 0,022\sigma - 2,421 \cdot 10^{-5}\sigma^2 - 2,847 \cdot 10^{-5}\sigma^3 + 3,543 \cdot 10^{-7}\sigma^4;$$

$$F'(\sigma) = 0,022 - 4,842 \cdot 10^{-5}\sigma - 8,541 \cdot 10^{-5}\sigma^2 + 1,4172 \cdot 10^{-6}\sigma^3;$$

$$F''(\sigma) = -4,842 \cdot 10^{-5} - 1,7082 \cdot 10^{-4}\sigma + 4,2516 \cdot 10^{-6}\sigma^2.$$

Корни уравнения  $F'(\sigma)=0$  равны:

$$\sigma_1 = -14,627 \text{ МПа}, \sigma_2 = 18,982 \text{ МПа} \text{ и } \sigma_3 = 55,912 \text{ МПа}.$$

Корни уравнения  $F''(\sigma)=0$  равны:

$$\sigma_1 = -0,281 \text{ МПа}, \sigma_2 = 40,159 \text{ МПа}.$$

Анализ полученных результатов показывает, что за опасные напряжения при сжатии должна быть принята величина  $\sigma_{\text{оп. с}} = \sigma_{\text{пр. с}} = 18,982$  МПа, а  $\sigma_{\text{оп. р}} = \sigma_{\text{пр. р}} = 40,159$  МПа - как наименьшие из значений  $\sigma_0$  и  $\sigma_{\text{пр}}$  при растяжении и сжатии.

## ТЕХНИЧЕСКОЕ ОСНАЩЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Сведения о свойствах пластмасс и материалов на их основе содержатся в многочисленных источниках. Сопоставить же эти свойства бывает затруднительно, так как различные авторы при исследовании физико-механических свойств полимерных материалов для проведения аналогичных испытаний пользуются самой различной испытательной и измерительной аппаратурой. К тому же свойства полимерных изделий изменяются с течением времени и весьма разнообразны даже в том случае, если они изготовлены из материала одной партии.

Знание как общих закономерностей механического поведения пластмасс, так и конкретных свойств определенной партии полимерного материала является насущной необходимостью для технологов и конструкторов, работающих в различных областях народного хозяйства. Разноречивые же сведения о свойствах полимерных материалов сдерживают их применение, несмотря на явные достоинства конструкций с использованием пластмасс (малый вес при достаточно высокой несущей способности и жесткости).

В этом смысле ГОСТы на испытания пластмасс призваны сыграть важную роль, вводя единые требования на методы испытаний. Но, к сожалению, действующие ГОСТы не отвечают современным научным представлениям о высокополимерах и поэтому несут в себе элемент формальности.

С одной стороны, свойства пластмасс целесообразно рассматривать в сравнении со свойствами традиционных конструкционных материалов. Такой подход позволяет использовать опыт длительной инженерной практики. С другой стороны, машины и аппаратура, предназначенные для испытания пластмасс, имеют свои особенности, связанные с присущими только высокополимерам свойствами.

Всестороннее научное исследование физико-механических свойств полимерных материалов невозможно без создания новых эффективных приборов и оборудования не только для фундаментальных исследований, но и для взятия пробы на "текущие" свойства используемой партии полимерного материала. В этих случаях условия испытаний должны быть продиктованы условиями изготовления и эксплуатации готовых изделий.

На основе строго количественных экспериментальных данных с использованием методов оценки надежности должен быть рассчитан гарантированный срок службы полимерного изделия.

Необходимость проведения сравнительного анализа механических свойств полимерных материалов при растяжении и сжатии, особенно в области малых (до  $\epsilon = 1-1,5$  %) деформаций, ограниченных применением линейной суперпозиции, требует очень тщательной постановки эксперимента. Чтобы получить результаты требуемой точности, необходимо создать одинаковые условия при проведении механических испытаний на растяжение и сжатие. Следует отметить, что для правильного понимания явления ползучести в пластмассах испытания при сжатии не менее важны, чем при растяжении.

## **РЕВЕРСОП ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ МАТЕРИАЛОВ НА РАСТЯЖЕНИЕ - СЖАТИЕ**

Испытание одного образца на различных испытательных установках при растяжении и сжатии не устраняет погрешностей сопоставляемых результатов эксперимента.

Применение реверсивного устройства [6] позволяет повысить надежность результатов сравнительных испытаний при растяжении и сжатии. Однако известный реверсор преобразует усилие растяжения в усилие сжатия, позволяет испытывать один образец на растяжной машине, но остается необходимость переустановки и образца, и измерительной аппаратуры, что вызывает дополнительные напряжения в весьма чувствительных полимерных образцах и не снимает погрешностей сравнительных испытаний.

Разработан метод реверсирования нагрузки, на основе которого была достигнута полная идентичность в опытах на ползучесть при растяжении и сжатии. Было разработано переключаемое реверсивное устройство, которое позволяет исследовать деформационные свойства при растяжении и сжатии на одном и том же образце в любой последовательности и без переустановок испытываемого образца и контрольно-измерительных приборов.



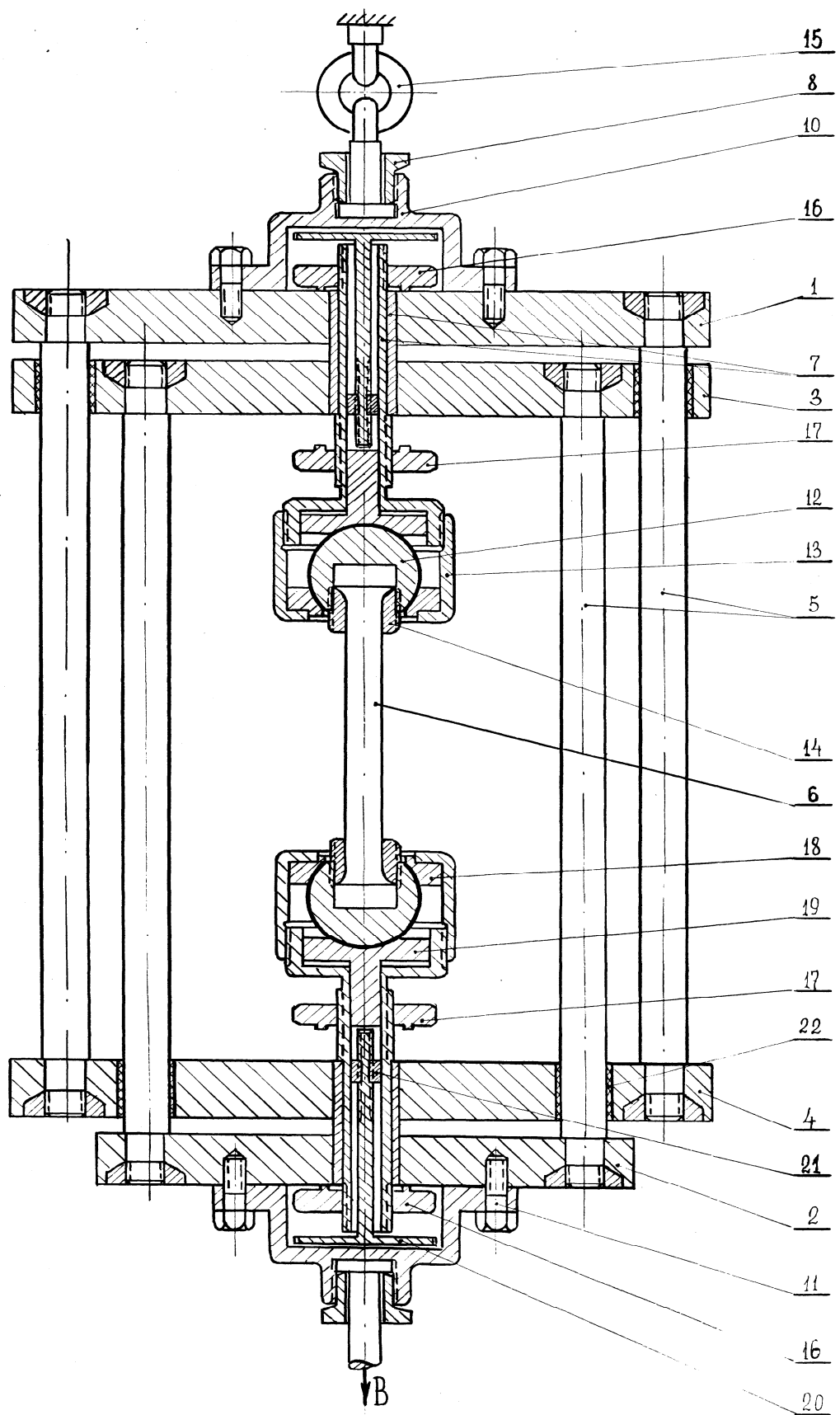


Рис. 6. Реверсор для испытаний образцов материала  
на растяжение - сжатие

Этим самым обеспечиваются одинаковые условия при работе образца на растяжение и сжатие, что дает надежные результаты для сопоставления механического поведения образца при указанных видах деформирования.

Применение сравнительно простого и дешевого реверсора в значительной степени расширяет возможности имеющихся в любой лаборатории прессов и растяжных машин без каких-либо дополнительных переделок.

На рис. 6 схематически изображен общий вид переключаемого реверсора для испытания на растяжение - сжатие в разрезе, работающего в режиме растяжения [5]. Он состоит из внешних 1 и 2 и внутренних 3 и 4 траверс, соединенных попарно направляющими колонками 5, которые обеспечивают строго заданное параллельно-поступательное перемещение траверс. Образец 6 закрепляется во втулках 7, установленных в отверстиях внутренних и внешних траверс, соосных с направлением усилия, передаваемого на реверсор от растяжной машины. Разрезные гайки 8 соединяют внешние траверсы 1 и 2 с тягами растяжной машины с помощью скоб 10 и болтов 11.

Образец с жестко посаженными на его головки сферами 12 крепится к втулкам с помощью нажимных гаек 13. Жесткое крепление сферы на образце достигается разрезными гайками 14 при соблюдении точных размеров головок образцов и сверлений в сферах, что не допускает образования зазоров.

В верхнюю тягу растяжной машины включено кольцо 15, которое выполняет роль сферического шарнира и позволяет реверсору самоустанавливаться по линии действия приложенного к нему усилия.

Для центрирования образца универсальный реверсор настраивается на режим растяжения. С этой целью наружные опорные гайки 16 подводятся к внешним траверсам до упора. Средние опорные гайки 17 отводятся от внутренних траверс, чтобы обеспечить их свободное перемещение при деформировании образца. При небольшой подгрузке образец самоустанавливается в сферических вкладышах по линии действия усилия. Образующиеся при этом в зажимном устройстве зазоры выбираются тарелками 19 за счет хода толкателей 20 в нарезке ниппелей 21. Скользящая посадка устраняет образование перекосов при перемещении тарелок во втулках. С помощью

такого приема образец жестко фиксируется в зажимном устройстве, а его соосность с действующим усилием сохраняется и при переходе от растяжения к сжатию.

Для уменьшения сил трения в движущихся частях универсального реверсора установлены бронзовые подшипники 22.

Испытание на растяжение при заданной нагрузке осуществляется расходящимся движением внешних траверс. Усилие на образец передается от внешних траверс 1 и 2 через наружные опорные гайки 16, втулки 7 и нажимные гайки 13.

Для осуществления режима работы на сжатие необходимо подвести средние опорные гайки 17 к внутренним траверсам 3 и 4 до упора, после чего отвести наружные гайки 16 от внешних траверс 1 и 2. Усилие на образец будет передаваться от внутренних траверс 3 и 4 через средние опорные гайки 17, втулки 7, тарелки 19, толкатели 20 и ниппели 21. При этом сближение траверс 3 и 4 осуществляет сжатие образца. Смена режимов нагружения может производиться как при действующем усилии, так и при отсутствии нагрузки на образец.

Направление усилия, прикладываемого к реверсору (по стрелке В), и направленные перемещения всех движущихся элементов растяжной машины и реверсора остаются без изменения как при растяжении, так и при сжатии. Таким образом, создаются совершенно идентичные условия для испытания образца в условиях осевого растяжения и сжатия. Вес нижней рамки реверсора компенсируется противовесами.

## **ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ**

Установленный в захватах реверсора образец плавно нагружают и производят отсчет деформаций. Интервалы времени для записи удлинения должны выбираться таким образом, чтобы в процессе испытания можно было полностью установить характер изменения удлинений. Нормы на продолжительность испытания и допуск на деформацию при заданном напряжении и температуре устанавливают для каждого материала в зависимости от его назначения. В лабораторной работе рекомендуется принять следующие временные интервалы измерения деформаций в минутах: 0,25; 0,5; 1; 2; 4; 8. Температура в помещении во время испытания должна быть по возможности постоянной.

Испытания образцов производят при разных уровнях напряжений. В зависимости от цели испытаний максимальный уровень напряжений выбирается по-разному. Если целью испытаний является выявление наличия особенностей механического поведения материала в диапазоне заданных величин деформаций и времени, то максимальное напряжение устанавливают по ГОСТ 3248-81. Если же цель испытания – определить предел ползучести материала, то максимальное напряжение ничем не ограничивается и определяется только механическими свойствами исследуемого материала. Число уровней напряжения выбирают так, чтобы можно было выявить особенности кривой  $R(\sigma)$ .

Испытания начинают при минимальном уровне постоянного напряжения. При этом образец испытывают сначала в условиях сжатия, после чего осуществляют отдых образца с целью восстановления его исходных размеров и структуры. После отдыха образец испытывают на растяжение при тех же значениях напряжения, времени и температуры. Затем испытания сжатием и растяжением повторяют при более высоком уровне напряжений с промежутками отдыха после каждого нагружения.

Измерение деформаций производят электроконтактным тензомером с мерной базой, равной 40 мм.

По результатам испытаний строят первичные кривые ползучести в координатах «относительная деформация  $\varepsilon$  – время  $t$ » при растяжении и сжатии (см. рис. 3), полученные при различных уровнях напряжений  $\sigma$ . По точкам этих кривых определяют  $R_1, R_2, \dots, R_i$  для каждого времени испытаний и строят изохронные кривые  $R(\sigma)$ , которые могут иметь вид, представленный на рис. 4 - 5.

При равных уровнях напряжений  $\sigma$  при растяжении и сжатии

$$R(\sigma) = \frac{\varepsilon_{\text{раст}}}{\varepsilon_{\text{сжат}}}.$$

Предел ползучести при сжатии (см. рис. 4) определяется по точке максимума кривых  $R(\sigma)$ , а при растяжении – по второй точке перегиба (см.рис. 5). При этом характер кривых может быть самым разнообразным. Так,  $R_{t1}$  и на рис. 4, и на рис. 5 не имеет характерных точек, определяющих предел ползучести в принятом диапазоне времени и напряжения. Следовательно, в этом диапазоне возможна безопасная эксплуатация изделия из исследуемого материала.

С увеличением времени действия нагрузки или величины напряжения эти точки появляются. Таким образом, прочностной предел ползучести отражает физико-механические свойства материала, являясь объективной характеристикой, связанной со временем эксплуатации конструкции.

В отчете должны быть указаны:

1. Наименование, марка материала по соответствующему стандарту или техническим условиям.

2. Размеры и форма образца (вид поперечного сечения, длина, диаметр).

3. Тип установки для испытаний.

4. Результаты испытаний:

- номер образца;
- вид испытания (растяжение или сжатие);
- температура испытания (К);
- напряжение  $\sigma$  (МПа);
- удлинения  $\Delta L$  (мкм) в заданные моменты времени  $t$ ;
- относительная деформация  $\varepsilon$  (%) в заданные моменты времени  $t$ ;
- продолжительность испытания;
- кривые ползучести  $\varepsilon(t)$ ;
- графики изменения параметра разномодульности  $R$  в зависимости от напряжения  $\sigma$  при фиксированном значении времени  $t$ ;
- значения предела ползучести  $\sigma_{пр}$ .

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 3248-81. Металлы. Метод испытания на ползучесть. М. : ГК СССР по стандартам. 1981. 9 с.
2. ГОСТ 18197-84 Пластмассы. Метод испытания на ползучесть при растяжении при постоянной нагрузке. М. : ГК СССР по стандартам. 1984. 10 с.

3. А. с. 890132 СССР, МКИ G 01 N 3/08. Способ определения характеристик ползучести образцов материалов / О. А. Одиноква, Ю. М. Даниловский (СССР). 1981. Бюл. № 46. 2 с.
4. Ю. Н. Работнов Расчет деталей машин на ползучесть / Ю. Н. Работнов // Изв. АН СССР. Отд. техн. наук. 1948. № 6. С. 789-800.
5. А. с. 356511 СССР, МКИ G 01 N 3/02. Универсальный реверсор для испытаний на растяжение - сжатие / О. А. Одиноква, В. В. Одиноква, П. В. Мелентьев (СССР). 1972. Бюл. № 32. 3 с.
6. М. М. Резниковский Механические испытания каучука и резины. /М. М. Резниковский, А. И. Лукомская. М.: Химия, 1968. 185 с.

**Оглавление**

Общие положения.....	3
Характеристики ползучести вязкоупругих материалов .....	4
Пример определения прочностного критерия ползучести .....	10
Техническое оснащение эксперимента .....	15
Реверсор для испытаний материалов на растяжение – сжатие .....	16
Порядок проведения испытаний .....	19
Библиографический список .....	21

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛА ПОЛЗУЧЕСТИ  
ВЯЗКОУПРУГИХ МАТЕРИАЛОВ**

Методические указания к выполнению лабораторной  
работы по курсу «Сопротивление материалов»  
для студентов всех технических специальностей

Ольга Анатольевна Одинокова

Главный редактор *Л. А. Суевалова*  
Редактор *Т. Ф. Шейкина*  
Компьютерная верстка *О. А. Одиноковой*

Подписано в печать 20.04.09. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага писчая. Гарнитура “Таймс”. Печать цифровая. Усл. печ. л. 1,4  
Тираж 130 экз. Заказ .

Издательство Тихоокеанского государственного университета.  
680035, Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136.

Отдел оперативной полиграфии издательства  
Тихоокеанского государственного университета.  
680035, Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136.