

УДК 539.375

© 1991 г.

М. Б. АХУНДОВ

## **МЕХАНИЗМ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАССЕЯННОГО РАЗРУШЕНИЯ КОМПОЗИТНЫХ СТРУКТУР**

Основы феноменологического описания поведения материалов, базирующегося на концепции накопления повреждений, заложены в [1–3]. Различные направления развития этих теорий были сосредоточены в [4–9]. В [10, 11] предложена модель деформирования и разрушения изотропных материалов в условиях сложного напряженного состояния, основанная на наследственном характере процессов обратимой ползучести и накопления повреждений, представляющая возможность прогнозирования деформационных и прочностных характеристик материала по результатам экспериментов на одноосное нагружение.

Композиционные материалы представляют важный класс анизотропных материалов. Условия разрушения анизотропных материалов строились, как обычно, по аналогии с подобными условиями для изотропных материалов. Так, например, предполагалось что так же, как и для изотропного тела, в пространстве напряжений существует некая предельная поверхность, ограничивающая область безопасных состояний. В [12] предложено описывать эту поверхность суммой двух совместных инвариантов тензоров напряжений и прочности. В [13] в качестве уравнений предельной поверхности предложена однородная функция напряжений, представляемая теми же инвариантами. Получили развитие работы, в которых построение критериев прочности анизотропных тел базируется на соответствующих условиях пластичности [3, 14, 15]. В [16] предлагаются критерии прочности анизотропных материалов, основанные на введении некоторых функций от совместных инвариантов тензора напряжений и векторов или тензоров, задающих геометрическую симметрию тела. Подобный путь продемонстрирован для трансверсально-изотропного тела в [17].

Некоторые исследования по построению условий прочности или пластичности для анизотропных тел были направлены по пути отыскания более естественных аналогов по отношению к изотропным телам. В [18] соотношения между напряжениями и пластическими деформациями анизотропной среды получены на основе теории малых упруго-пластических деформаций Ильющина А. А. путем «замены» анизотропного тела некоторым изотропным телом, деформированное состояние которого адекватно деформированному состоянию анизотропного тела, а напряженное состояние является функцией напряженного состояния тела и некоторых параметров анизотропии. В [19] вводятся аналоги компонент девиаторов и шаровых частей тензоров напряжений и деформаций, а также обобщенные интенсивности напряжений и деформаций таким образом, чтобы иметь возможность записать три основных постулата деформационной теории пластичности Генки в традиционной для изотропного тела форме. Работы [20, 21] позволили по новому взглянуть на подобные попытки. Оказалось, что для того, чтобы перенести разработанные для упругого изотропного тела условия предельного состояния естественным образом на анизотропные тела, нет надобности моделировать последние, исходя из каких-либо предположений, некоторыми изотропными телами. Для этого достаточно заменить разложение упругой энергии деформирования на конечное число взаимно-независимых упругих энергий так называемых собственных состояний, подобно тому, как для изотропного тела упругая энергия представима в виде суммы энергии изменения объема и энергии формоизменения.

Альтернативным в построении критериев предельности композитных материалов является направление, основанное на структурном подходе [26, 22, 23, 24, 25]. Этот подход позволяет наиболее точно конкретизировать данный композитный материал, но уступает подходу, основанному на рассмотрении композитного материала как томогенного анизотропного материала, возможностями общего математического исследования поведения конструкций. Работа [20] является примером синтеза указанных двух подходов, ибо общее математическое представление определяющего соотношения, данное в форме собственных состояний, различает композитные материалы, относящиеся к одному и тому же виду анизотропии, но имеющие различные

структуры. Последнее предопределило мотивы использования в предложенных в [11] соотношений деформирования и рассеянного разрушения наследственно-упругих композитов результатов [20]. В [11] предложены соответствующие определяющие уравнения и критерий прочности для анизотропного материала. В настоящей работе обсуждаются различные аспекты ее применимости и дается экспериментальное подтверждение выписанных соотношений на примере углепластика. Показано, что все параметры материала могут быть определены из опытов на одноосное нагружение.

1. Примем, что полная деформация складывается из мгновенно упругой деформации  $\varepsilon_{ij}^1$ , деформации обратимой ползучести  $\varepsilon_{ij}^2$  и деформации, определяемой поврежденностью  $\varepsilon_{ij}^3$ :

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^1 + \varepsilon_{ij}^2 + \varepsilon_{ij}^3 \quad (1.1)$$

$$\varepsilon_{ij}^1 = C_{ijkl} \sigma^{kl}; \quad \varepsilon_{ij}^2 = L_{ijkl}^* \sigma^{kl}; \quad \varepsilon_{ij}^3 = M_{ijkl}^* \sigma^{kl} \quad (1.2)$$

где операторы  $L_{ijkl}^*$  и  $M_{ijkl}^*$  наследственного типа  $F^* f(t) = \int_{-\infty}^t F(t-\tau) f(\tau) d\tau$ ,

характеризующие соответственно процессы обратимой ползучести и накопления повреждений. Деформационные соотношения, следующие из (1.1) и (1.2):

$$\varepsilon_{ij}(t) = C_{ijkl} \sigma^{kl} + L_{ijkl}^* \sigma^{kl} + M_{ijkl}^* \sigma^{kl} \quad (1.3)$$

были даны в [11]. Операторы вязкости  $L_{i,kl}^*$  и поврежденности  $M_{i,k}^*$  на активных участках нагружения не имеют принципиальных различий и могут быть объединены. Однако, когда реализуемое в теле напряженное состояние не способствует процессу накопления повреждений, действие операторов поврежденности прекращается. Формулировка условий активного нагружения для каждого оператора поврежденности  $M_{ijkl}^*$  не может быть инвариантной. Поэтому запишем соотношения (1.3) в терминах собственных состояний [11]:

$$\lambda_\alpha \varepsilon_\alpha = \sigma_\alpha + L_\alpha^* \sigma_\alpha + M_\alpha^* \sigma_\alpha, \quad \alpha = \overline{1, r}, \quad r \leq 6 \quad (1.4)$$

где  $\varepsilon_\alpha$ ,  $\sigma_\alpha$  — тензоры собственных состояний деформаций и напряжений, кроме того

$$L_\alpha^* = \sum_{p=1}^{p_1} \lambda_\alpha l_\alpha^{(p)} \varphi_{(p)}^*, \quad M_\alpha^* = \sum_{p=1}^{p_2} \lambda_\alpha m_\alpha^{(p)} f_{(p)}^*, \quad \mu_\alpha = a_{ijkl} P_{(\alpha)ijkl}$$

$$L_{ijkl}(t) = \sum_{p=1}^{p_1} l_{ijkl}^{(p)} \varphi_{(p)}(t), \quad M_{ijkl}(t) = \sum_{p=1}^{p_2} m_{ijkl}^{(p)} f_{(p)}(t) \quad (1.5)$$

$$\mu_\alpha = \{\lambda_\alpha^{-1}, l_\alpha, m_\alpha\}, \quad a_{ijkl} = \{c_{ijkl}, l_{ijkl}, m_{ijkl}\} \quad (1.6)$$

где  $P_{(\alpha)ijkl}$  — соответствующие проекторы [20]. Переход от (1.3) к (1.4) основан на предположении о соосности тензоров  $a_{ijkl}$  [21]. Каждое из соотношений (1.4) независимо от остальных, а уравнение с номером  $\alpha$  относительно  $q_\alpha$  скалярным уравнением, причем  $\sum q_\alpha = 6$  ( $\alpha = \overline{1, r}$ ). Как следует из (1.4), число подлежащих определению ядер операторов ползучести и поврежденности в самом общем случае анизотропии не превышает двенадцати.

Для изотропных тел в (1.4), (1.5) следует положить  $r=2$ ,  $q_1=1$ ,  $q_2=5$ , соотношения (1.4) будут представлять собой разложения определяющих уравнений на соответствующие для шаровых частей и дивергентов тензоров деформаций и напряжений, представляющих два собственных состояния для изотропного материала, по каждому из которых идет про-

цесс накопления повреждений, описываемый своим оператором поврежденности. По аналогии примем, что для анизотропного тела процесс накопления повреждений происходит автономно по каждому из собственных состояний и описывается соответствующим оператором  $M_\alpha^*$ . Тогда с учетом того, какие структурные составляющие анизотропного тела задействованы в том или ином собственном состоянии, представляется возможность более обоснованного определения активных участков нагружения. За подобные условия примем следующие

$$\sigma_\alpha^* \geq 0, \quad \sigma_\alpha = (\sigma_\alpha \cdot \sigma_\alpha)^{1/2} \quad (1.7)$$

Для изотропного материала условия (1.7) переходят в следующие

$$\sigma_u^* \geq 0, \quad \sigma^* \geq 0 \quad (1.8)$$

где  $\sigma_u = (s_{ij} \cdot s_{ij})^{1/2}$  — интенсивность касательных усилий,  $s_{ij}$  — компоненты девиатора тензора напряжений,  $\sigma = \sigma_{ii}$  — шаровая часть тензора напряжений.

Предыдущие рассуждения позволяют выписать и два возможных критерия разрушения. Принимая, что время разрушения материала определяется суммарным уровнем накопленных по всем собственным состояниям дефектов, приходим к следующему критерию прочности

$$\sum_{\alpha=1}^r \chi_\alpha [(\sigma_\alpha + M_\alpha^* \sigma_\alpha) (\sigma_\alpha + M_\alpha^* \sigma_\alpha)]^{1/2} = 1 \quad (1.9)$$

где  $\chi_\alpha$  — постоянные, определяемые из соответствующих экспериментов.

Принимая, что разрушение материала определяется наибольшим уровнем накопленного объема поврежденности по какому либо из собственных состояний, получим критерий прочности вида ( $\sigma_0$  — экспериментальная постоянная):

$$\max_{\alpha} \{(\sigma_\alpha + M_\alpha^* \sigma_\alpha) (\sigma_\alpha + M_\alpha^* \sigma_\alpha)\}^{1/2} = \sigma_0 \quad (1.10)$$

Для изотропного материала критерий прочности (1.9) будет иметь вид

$$\chi_1 [(s_{ij} + M_1^* s_{ij}) (s_{ij} + M_1^* s_{ij})]^{1/2} + \chi_2 (\sigma + M_2^* \sigma) = 1 \quad (1.11)$$

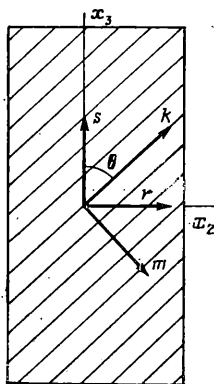
2. Экспериментальное подтверждение выписанных соотношений и приведенных рассуждений было проведено на примере однонаправленно армированного композита. Для плоского образца (фиг. 1) ( $k$  — вектор направления волокон в композите) при обобщенном плоском напряженном состоянии нормы тензоров собственных состояний на основании определенных в [20] базисных тензоров и проекторов будут иметь вид

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= 2^{-1/2} (p \sin \kappa + \sqrt{3} \sigma_k \sin (\kappa_0 - \kappa)) \\ \sigma_2 &= 2^{-1/2} (p \cos \kappa - \sqrt{3} \sigma_k \cos (\kappa_0 - \kappa)) \\ \sigma_3 &= 2^{1/2} \tau_{m,k}, \quad \sigma_4 = 2^{-1/2} \sigma_m \end{aligned} \quad (2.1)$$

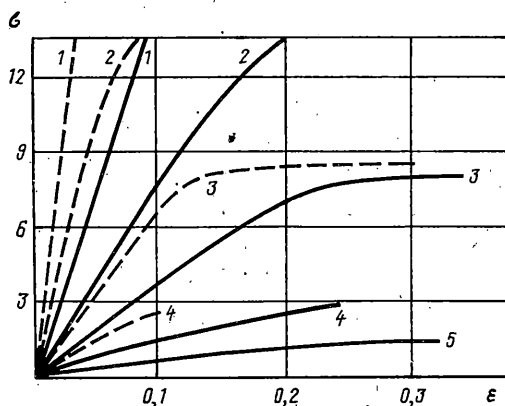
где  $\sigma_k$  представляет усилие в волокне,  $\sigma_m$  — нормальное к волокну усилие в связующем,  $\tau_{m,k}$  — касательное усилие в связующем,  $p = \sigma_{ii}$  — гидростатическое давление,  $\kappa$  — параметр перераспределения жесткости, характеризующий отклонение материала от объемно-изотропного, для которого  $\kappa = \kappa_0$ , где  $\operatorname{tg} \kappa_0 = 2^{1/2}$ .

Если считать, что разрушение определяется третьим и четвертым собственными состояниями, то предельное условие при мгновенном приложении усилий, получаемое из критерия прочности (1.9), имеет вид

$$\sigma_m + a \tau_{m,k} = c \quad (2.2)$$



Фиг. 1



Фиг. 2

Подобного рода критерий прочности для однонаправленного композита был эмпирически предложен и подтвержден результатами многочисленных экспериментов [23].

С учетом введенных обозначений (1.6) модули упругости, вязкости и поврежденности на основании известных соотношений [28] будут иметь вид

$$E_{\mu}^{-1}(s) = \frac{1}{2}(\mu_1 \sin^2 \kappa + \mu_2 \cos^2 \kappa + \mu_3) \sin^4 \theta + [2^{-1/2}(\mu_1 - \mu_2) \sin 2\kappa + 2\mu_3] \sin^2 \theta \cos^2 \theta + (\mu_1 \cos^2 \kappa + \mu_2 \sin^2 \kappa) \cos^4 \theta \quad (2.3)$$

$$-\nu_{\mu}(s, r)/E_{\mu}(s) = \frac{1}{2}(\mu_1 \sin^2 \kappa + \mu_2 \cos^2 \kappa + \mu_3) + (\mu_1 \cos^2 \kappa + \mu_2 \sin^2 \kappa) - 2^{-1/2}(\mu_1 - \mu_2) \sin 2\kappa - 2\mu_3 \times \times \sin^2 \theta \cos^2 \theta + 2^{-3/2}(\mu_1 - \mu_2) \sin 2\kappa \quad (2.4)$$

Материальные константы  $\mu_{\alpha}(\lambda_{\alpha}^{-1}, l_{\alpha}, m_{\alpha})$  и параметр  $\kappa$  определялись из опытов на ползучесть при одноосном растяжении для некоторых углов  $\theta$ , составляемых направлениями растяжения и армирования композита.

Приняв в качестве ядер  $\varphi(t-\tau) = f(t-\tau) = (t-\tau)^{-\alpha}$ , из формулы (1.4) получим следующие расчетные формулы для модулей  $E_{\mu}(\theta)$ , где  $\mu = \{\lambda, l, m\}$ ,  $t_*$  — время начала разгрузки:

для процесса прямой ползучести ( $\sigma = \text{const}$ ) и при разгрузке соответственно

$$\varepsilon(\theta) = \left[ \frac{1}{E_{\lambda}(\theta)} + \left( \frac{1}{E_l(\theta)} + \frac{1}{E_m(\theta)} \right) \frac{t^{1-\alpha}}{1-\alpha} \right] \sigma \quad (2.5)$$

$$\varepsilon(\theta) = \frac{\sigma}{1-\alpha} \left\{ \frac{1}{E_l(\theta)} [t^{1-\alpha} - (t-t_*)^{1-\alpha}] + \frac{1}{E_m(\theta)} t_*^{1-\alpha} \right\} \quad (2.6)$$

В соответствии (2.5), (2.6) модули  $E_{\lambda}(\theta)$ ,  $E_l(\theta)$  и  $E_m(\theta)$  выражаются формулой (2.3) через материальные константы соответственно упругости  $\lambda_{\alpha}$ , вязкости  $l_{\alpha}$ , поврежденности  $m_{\alpha}$ , а также параметр перераспределения жесткости  $\kappa$ , физический смысл которого пояснен выше. Следует отметить, что  $E_{\lambda}(\theta)$  представляет собой обычный модуль упругости Юнга в направлении вырезки образца. В свою очередь модуль вязкости  $E_l(\theta)$  и поврежденности  $E_m(\theta)$  при схожем обозначении с модулем упругости  $E_{\lambda}(\theta)$  имеют принципиальное с ним расхождение: так, например, они имеют разную размерность.

Таблица 1

$\theta^\circ$	$E_\lambda(\theta)$	$(E_l^{-1}(\theta) + E_m^{-1}(\theta)) \cdot 10^5$	$E_l^{-1}(\theta) \cdot 10^5$	$E_m^{-1}(\theta) \cdot 10^5$
0	13032	0,0517	0,0262	0,0255
	13000 *			
10	7360	0,1172	0,05863	0,05857
	8000 *			
22,5	2700	0,3576	0,18026	0,17734
	3500 *			
45	1106	0,97 *	0,49 *	0,48 *
	1100 *			
90	712	1,5313	0,77385	0,75745
	700 *			

Таблица 2

$\theta=10^\circ, \quad \sigma=11, \quad 0 < t < 5, \quad \sigma=12, \quad t > 5$							
$t$	0,5	2	5	10	60	122	180
$\varepsilon$	0,163	0,165	0,166	0,182	0,186	0,188	0,189
	0,168	0,17	0,17	0,191	0,208	0,212	0,216

Экспериментальное определение на основе расчетных формул (2.5), (2.6) модулей  $E_\lambda(\theta)$ ,  $E_l(\theta)$  и  $E_m(\theta)$  позволяет на основе представлений (2.3) и (2.4) найти параметры определяющих уравнений (1.4)  $\lambda_\alpha$ ,  $l_\alpha$ ,  $m_\alpha$  и  $\kappa$ . С этой целью были проведены эксперименты на однонаправленно армированном углепластике КМУ-ЗЛ. Образцы, имеющие форму пластинок размерами  $200 \times 9,6 \times 2,2$  мм, вырезались под углами 0, 10, 22,5, 45 и  $90^\circ$  к направлению армирования. Предварительно была проведена серия испытаний на статическое растяжение до разрушения, а также на растяжение до уровня ниже разрушающего с последующей разгрузкой. Испытания проводились в ИМАШ на машине «Инстрон» при комнатной температуре в режиме мягкого стационарного нагружения с записью продольной и поперечной деформаций при двух значениях скоростей деформаций:  $\dot{\varepsilon} = 0,1; 0,01$  мин<sup>-1</sup>. На фиг. 2 приведены статические кривые зависимостей  $\sigma \sim \varepsilon$  ( $\sigma$  кг/мм<sup>2</sup>,  $\varepsilon$  %) для продольной (сплошная линия) и поперечной (штриховая линия) деформаций при  $\dot{\varepsilon} = 0,1$  мин<sup>-1</sup> ( $1 - \theta = 0^\circ$ ,  $2 - \theta = 10^\circ$ ,  $3 - \theta = 22,5^\circ$ ,  $4 - \theta = 25^\circ$ ,  $5 - \theta = 90^\circ$ ). По этим кривым деформирования определялись коэффициенты Пуассона.

С целью определения длительных характеристик и их зависимости от угла вырезки образца была проведена серия испытаний на прямую и обратную ползучесть образцов из того же углепластика, из которого вырезались образцы для испытаний на статическое растяжение. Здесь образцы вырезались под теми же пятью значениями углов к направлению армирования, что и при статических испытаниях. Эксперименты на ползучесть проводились на специальной шестисекционной установке [29] в ИМАШ. В результате были получены кривые прямой и обратной ползучести при уровнях растягивающих усилий, приведенных в табл. 2—5 ( $\sigma$  кг/мм<sup>2</sup>,  $\varepsilon$  %,  $t$  мин).

Таблица 3

	$\theta=22,5^\circ$		$\sigma=6$	
$t$	5	10	20	50
$\varepsilon$	0,196	0,198	0,2	0,203
	0,194	0,196	0,198	0,2

Таблица 4

	$\theta=45^\circ$		$\sigma=2,5$	
$t$	40	100	130	175
$\varepsilon$	0,262	0,266	0,269	0,270
	0,265	0,270	0,278	0,280

Таблица 5

	$\theta=90^\circ$				$\sigma=1,34$	
$t$	0,5	1	10	50	90	120
$\varepsilon$	0,211	0,212	0,217	0,222	0,223	0,224
	0,200	0,204	0,206	0,208	0,214	0,214

Таблица 6

	$\theta=22,5^\circ$		$t_*=1460$		$\sigma=6$	
$t$	1461,5	1462	1463			
$\varepsilon$	0,033	0,0328	0,032			
	0,032	0,03	0,029			

Таблица 7

	$\theta=45^\circ$		$t_*=175$		$\sigma=2,5$	
$t$	177	187	200			
$\varepsilon$	0,0274	0,025	0,021			
	0,028	0,024	0,022			

При обработке экспериментальных кривых была использована методика, предложенная в [30]. Сначала для каждого значения угла  $\theta$  по кривым прямой ползучести на основании формулы (2.5) определялись параметр ядра  $\alpha$ , который оказался равным 0,9, и  $E_l^{-1}(\theta) + E_m^{-1}(\theta)$ . Далее по кривым разгрузки, пользуясь формулой (2.6), определялись порознь параметры  $E_l^{-1}(\theta)$  и  $E_m^{-1}(\theta)$ . По этим значениям для углов  $\theta=0$  и  $45^\circ$  на основании формул (2.3) и (2.4) были определены материальные константы  $\mu_\alpha$ ,  $\kappa$ . При этом в качестве значений коэффициента Пуассона брались их длительные значения, полученные при  $\dot{\varepsilon}=0,01$  мин $^{-1}$ :  $\nu(0, 90^\circ)=0,3$ ,  $\nu(-45, 45^\circ)=0,2$ . Далее по формуле (2.3) рассчитывались параметры  $E_\mu^{-1}(\theta)$  для остальных значений угла  $\theta=10; 22,5; 90^\circ$ .

В табл. 1 приведена сводка экспериментальных и расчетных данных. На основании последних по формуле (2.5) определялись значения деформаций ползучести для углов  $\theta=10; 22,5; 90^\circ$ , сравнительные расчетные и экспериментальные значения которых приведены в табл. 2—5. Далее по формуле (2.6) рассчитывались значения деформаций при разгрузке для двух значений величины угла  $\theta=22,5; 45^\circ$ . Соответствующие экспериментальные и расчетные значения приведены в табл. 6—7. В табл. 2—7 первая строка чисел — расчет, вторая — эксперимент,  $\varepsilon$  измеряется в процентах.

Наблюдаемая вполне удовлетворительная согласуемость экспериментальных и расчетных данных является подтверждением непротиворечивости и корректности предложенной в данной работе модели деформирования и разрушения анизотропных тел, одним из важных достоинств которой является возможность определения материальных констант из минимального числа простых экспериментов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Работнов Ю. Н.* Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука, 1979. 744 с.
2. *Качанов Л. М.* Основы механики разрушения. М.: Наука, 1974. 341 с.
3. *Ильющин А. А.* Об одной теории длительной прочности // Инж. ж. МТТ. 1967. № 3. С. 21–35.
4. *Бологин В. В.* Объединенные модели в механике разрушения // Изв. АН СССР. МТТ. 1984. № 3. С. 127–137.
5. *Новожилов В. В.* О перспективах феноменологического подхода к проблеме разрушения // Механика деформируемых тел и конструкций. М.: Машиностроение, 1975. С. 349–359.
6. *Суворова Ю. В.* О критерии прочности, основанном на накоплении поврежденности, и его приложении к композитам // Изв. АН СССР. МТТ. 1979. № 4. С. 107–111.
7. *Тамуж В. П., Куксенко В. С.* Микромеханика разрушения полимерных материалов. Рига: Зинатне, 1978. 294 с.
8. *Шестериков С. А., Локощенко А. М.* Ползучесть и длительная прочность металлов. Итоги науки и техники. Сер. Механика деформируемого твердого тела. М.: ВИНТИ, 1980. Т. 13. С. 3–104.
9. *Кондауров В. И., Мухамедиев Ш. А., Никитин Л. В., Рыжак Е. И.* Механика разрушения горных пород. М.: Изд. Ин-т физики Земли АН СССР, 1987. 213 с.
10. *Суворова Ю. В., Азундов М. Б., Иванов В. Г.* Деформирование и разрушение повреждающихся изотропных тел при сложном напряженном состоянии // Механика композит. материалов. 1987. № 3. С. 396–402.
11. *Азундов М. Б.* Деформирование, рассеянное разрушение и критерии прочности неупругих композитов // Изв. АН СССР. МТТ. 1988. № 2. С. 112–117.
12. *Малмейстер А. А., Тамуж В. П., Тетерс Г. А.* Сопротивление жестких полимерных материалов. Рига: Зинатне, 1972. 498 с.
13. *Гольденблат И. И., Колнов В. А.* Критерии прочности и пластичности конструкционных материалов. М.: Машиностроение, 1968. 191 с.
14. *Ломакин В. А.* О теории нелинейной упругости и пластичности анизотропных тел // Изд-во АН СССР. Механика и машиностроение. 1960. № 4. С. 60–64.
15. *Мансуров Р. М.* Об упруго-пластическом поведении анизотропных сред // Упругость и неупругость. М.: Изд-во МГУ, 1971. Вып. 1. С. 163–171.
16. *Победря Б. Е.* Критерии прочности анизотропного материала // ПММ. 1988. Т. 52. Вып. 1. С. 141–144.
17. *Клюшников В. Д.* Лекции по физическим основам прочности и пластичности. М.: Изд-во МГУ, 1988.
18. *Ковальчук Б. И.* К теории пластического деформирования анизотропных материалов // Проблемы прочности. 1975. № 9. С. 8–12.
19. *Геоджаев В. О., Осокин А. Е., Перлин П. И.* Об одном подходе к решению задач упругопластического деформирования анизотропной среды // Докл. АН СССР. 1981. Т. 261. № 5. С. 1082–1085.
20. *Рыжлевский Я.* Математическая структура упругих тел. М.: Препринт Ин-та пробл. механики АН СССР № 217. 1983. 113 с.
21. *Рыжлевский Я.* Разложения упругой энергии и критерий предельности // Успехи механики. 1987. Т. 7. Вып. 3. С. 51–80.
22. *Работнов Ю. Н., Степанычев Е. И.* Описание упруго-пластических анизотропных свойств стеклопластиков // Изв. АН СССР. МТТ. 1968. № 1. С. 63–73.
23. *Полилов А. Н.* Критерий разрушения поверхности раздела в однонаправленных композитах // Изв. АН СССР. МТТ. 1978. № 2. С. 115–119.
24. *Работнов Ю. Н.* Введение в механику разрушения. М.: Наука, 1987. 80 с.
25. *Ванин Г. А.* Микромеханика композиционных материалов. Киев: Наук. думка, 1985. 302 с.
26. *Цай С., Хан Х.* Анализ разрушения композитов // Неупругие свойства композиционных материалов. М.: Мир, 1978. С. 104–139.
27. *Кристensen Р.* Введение в теорию вязкоупругости. М.: Мир, 1974. 338 с.
28. *Сирогин Ю. И., Шаскольская М. П.* Основы кристаллофизики. М.: Наука, 1975. 680 с.
29. *Работнов Ю. Н., Махмутов И. М., Петров К. И., Степанычев Е. И.* Установка для изучения ползучести и длительной прочности стеклопластмасс // Машиноведение. 1971. № 2. С. 75–77.
30. *Суворова Ю. В., Финогенов Г. Н., Машинская Г. П., Васильев А. Е.* Методика обработки кривых деформирования и ползучести органоловолокнитов // Машиноведение. 1978. № 6. С. 52–57.

Баку

Поступила в редакцию  
14.XII.1989