

УДК 539.374+376

ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛЗУЧЕСТИ И РАЗРУШЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КИНЕТИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ФОРМЕ

Б. В. Горев, И. В. Любашевская,
В. А. Панамарев*, С. В. Иявойнен**

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия

* Сибирский государственный индустриальный университет, 654007 Новокузнецк, Россия

** Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск, Россия

E-mails: gorevbw@yandex.ru, lbi@ngs.ru, panva@gde.ru, svetaiavoynen@gmail.com

Экспериментально и теоретически обоснована возможность использования уравнений кинетической теории ползучести Работнова со скалярным параметром поврежденности для описания процессов деформирования (вплоть до разрушения) металлических материалов в условиях ползучести без ограничений на значения деформаций ползучести и диссипации энергии в момент разрушения. При определении функциональных зависимостей в уравнениях ползучести и повреждаемости параметр поврежденности определяется величиной удельной нормированной диссипации энергии в процессе ползучести материала при необходимом условии подобия исходных кривых ползучести для постоянных напряжений и температур в нормированных переменных.

Ключевые слова: кинетическая теория ползучести, разрушение, скалярный параметр поврежденности, эквивалентные напряжения, удельная нормированная диссипация энергии.

Введение. В современном машиностроении применяются новые ресурсосберегающие технологии формообразования с изменяющимися температурно-скоростными параметрами процесса. Для использования в промышленности нетрадиционных методов обработки материалов давлением при медленных режимах нагружения, которые реализуются преимущественно за счет деформаций ползучести и последующей релаксации, и получения оценки остаточного эксплуатационного ресурса деталей после стадии изготовления необходимо провести исследования процессов ползучести и разрушения материалов.

Интервалы температур эксплуатационных режимов работы элементов конструкций обычно задаются таким образом, чтобы в этих диапазонах материал был по возможности структурно-стабильным. Изучение особенностей деформационно-прочностного поведения в условиях ползучести современных металлических материалов, широко используемых в авиа- и судостроении, энергетическом и общем машиностроении, представляет интерес как при решении технологических задач обработки материалов давлением при медленных

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 11-08-00845-а, 11-01-00522-а).

режимах деформирования включая режимы сверхпластичности, так и при оценке работоспособности элементов конструкций.

Деформационно-прочностные свойства конструкционных материалов существенно зависят от исходного состояния материала, температуры, скорости нагружения (деформирования) и вида напряженного состояния. При этом различие поведения материалов может быть не только количественным, но и качественным. При быстром упругопластическом нагружении материал может быть изотропным, а при медленном нагружении в условиях ползучести вести себя как анизотропный материал с различными свойствами при растяжении и сжатии [1]. Так, при деформировании материалов в режиме сверхпластичности установившееся течение происходит практически без стадий упрочнения и разупрочнения вплоть до разрушения, а в режимах, близких к режиму сверхпластичности, материал может вести себя как разупрочняющаяся среда с начальным упрочнением или без него.

Как правило, в технологических режимах, совмещенных с термообработкой сплавов, при температурах старения, возврата, отжига [2] процесс деформирования материала включает длительную установившуюся стадию и непродолжительную стадию разупрочнения, предшествующую разрушению.

Применительно к технологическим задачам обработки материалов давлением, в частности формообразования корпусных элементов изделий, в [2, 3] показано, что исходный текстурированный материал заготовки (прокатанные плиты различной толщины, листы), как правило, является существенно анизотропным материалом с различными свойствами при растяжении и сжатии. Наиболее интенсивно процесс ползучести происходит в образцах, вырезанных из плит под углом 45° к нормали к плите.

В работе [4] для материалов, у которых отсутствует стадия упрочнения при ползучести, показана принципиальная возможность описания процессов деформирования вплоть до разрушения с использованием кинетических уравнений с параметром поврежденности материала $\omega = \varepsilon/\varepsilon_*$, $\varepsilon_* \neq \text{const}$ [5].

1. Основные соотношения и гипотезы энергетического варианта кинетических теорий ползучести и повреждаемости. Ниже рассматривается неупрочняющийся материал в рамках энергетического варианта теории ползучести, когда в качестве меры интенсивности процесса ползучести принимается мощность рассеяния энергии при ползучести $W = \dot{\varepsilon}_{ij}^c \sigma_{ij}$ [6]. В случае одноосной ползучести и повреждаемости со скалярным параметром поврежденности q кинетические уравнения Работнова, записанные в энергетических величинах, имеют вид [8]

$$\frac{dA}{dt} = \frac{f(\sigma)}{(1-q)^\mu}, \quad \frac{dq}{dt} = \frac{\Phi(\sigma)}{(1-q)^k} \quad (0 \leq q \leq 1), \quad (1)$$

где $A = \int_0^t W dt = \int_0^{\varepsilon^c} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}^c$ — диссипация энергии при ползучести; функции f , Φ и коэффициенты μ , k зависят от температуры T . Вводя при произвольном напряженном состоянии приведенное время

$$\tau = (k+1) \int_0^t \Phi(\sigma) dt,$$

перейдем к новым обозначениям при условии $k+1 > \mu$:

$$1 - \omega = (1 - q)^{k-\mu+1} \quad (0 \leq \omega \leq 1). \quad (2)$$

С использованием полученного соотношения система исходных уравнений (1) принимает вид

$$\frac{dA}{dt} = \frac{f(\sigma)}{\psi(\omega)}, \quad \frac{d\omega}{dt} = \frac{\varphi(\sigma)}{\psi(\omega)} \quad (0 \leq \omega \leq 1), \quad (3)$$

где $\psi(\omega) = (1-\omega)^m$ — функция разупрочнения; $\varphi(\sigma) = (k-\mu+1)\Phi(\sigma)$; $m = \mu/(k-\mu+1)$ — коэффициент разупрочнения. С учетом введенных обозначений имеем уравнение единой кривой

$$(1-\omega)^{m+1} = 1 - \tau \quad (0 \leq \tau \leq 1), \quad (4)$$

которое единообразно описывает экспериментальные данные. Учитывая функциональную связь ω с исходным параметром поврежденности q (2), о поврежденности материала можно судить по параметру ω . В дальнейшем будем рассматривать параметр ω как параметр поврежденности и записывать определяющие уравнения для описания процесса ползучести и длительной прочности в виде (3) с одними и теми же коэффициентами разупрочнения m в обоих уравнениях [6–10].

Для вычисления констант, определяющих функции в системе (3), анализируются экспериментальные данные о ползучести при постоянных значениях напряжения и температуры. Разделив первое уравнение в (3) на второе и проинтегрировав полученное дифференциальное уравнение, имеем

$$A = \frac{f(\sigma)}{\varphi(\sigma)} \omega, \quad A_* = \frac{f(\sigma)}{\varphi(\sigma)}, \quad \omega = \frac{A}{A_*} \quad (0 \leq \omega \leq 1).$$

Таким образом, в случае одноосного деформирования параметр поврежденности ω есть отношение текущей работы рассеяния A к ее значению в момент разрушения A_* , т. е. нормированная работа.

Проинтегрировав второе уравнение в (3), из (4) получаем

$$\tau = t/t_*, \quad t_* = [(m+1)\varphi(\sigma)]^{-1}, \\ \omega = 1 - [1 - (m+1)\varphi(\sigma)t]^{1/(m+1)}.$$

Таким образом, нормированное время ($0 \leq \tau \leq 1$) представляет собой отношение текущего времени к времени разрушения t_* .

Следует отметить, что в ряде работ (см. [11–13]) в (1) априори полагается $\mu = k$ или путем замены (2) исходная система приводится к виду (3). Однако сначала необходимо проверить справедливость гипотезы единой кривой для экспериментальных кривых ползучести, построенных в нормированных координатах $t - \omega$, а затем использовать систему (3) для определения аппроксимационных коэффициентов уравнений и выполнения расчетов.

Приведем аналогичные соотношения при постоянной температуре, в которых используются одни и те же функции при параметре поврежденности ω в уравнениях ползучести и повреждаемости для материалов с упрочнением.

По аналогии с [14] для материалов, имеющих три стадии ползучести, примем функцию повреждаемости в виде $\psi(\omega) = \omega^\alpha(1-\omega^{\alpha+1})^m$, где α — параметр упрочнения.

Проинтегрировав уравнение повреждаемости при постоянных значениях напряжения для заданной температуры, получаем

$$\int_{\omega}^1 \omega^\alpha(1-\omega^{\alpha+1})^m d\omega = \int_t^{t^*} \varphi(\sigma) dt,$$

следовательно, $((\alpha+1)(m+1))^{-1}(1-\omega^{\alpha+1})^{m+1} = \varphi(\sigma)(t^*-t)$. При интегрировании функции повреждаемости вплоть до разрушения:

$$\int_0^1 \omega^\alpha (1 - \omega^{\alpha+1})^m d\omega = \int_0^{t^*} \varphi(\sigma) dt$$

получаем $t^* = ((\alpha+1)(m+1)\varphi(\sigma))^{-1}$. Тогда выражение для приведенного времени имеет вид

$$\bar{\tau} = t/t_*, \quad \bar{\tau} = (\alpha+1)(m+1)\varphi(\sigma)t.$$

В этом случае уравнение единой кривой повреждаемости записывается в следующем виде:

$$(1 - \omega^{\alpha+1})^{m+1} = 1 - \bar{\tau}. \quad (5)$$

Таким образом, для материалов, имеющих три стадии ползучести, из решения системы кинетических уравнений ползучести и длительной прочности

$$\frac{dA}{dt} = \frac{f(\sigma)}{\omega^\alpha (1 - \omega^{\alpha+1})^m}, \quad \frac{d\omega}{dt} = \frac{\varphi(\sigma)}{\omega^\alpha (1 - \omega^{\alpha+1})^m}, \quad A = \int_0^t \sigma \dot{\varepsilon}^c dt \quad (6)$$

при постоянных температурах и напряжениях в условиях одномерного напряженного состояния следуют аналитические выражения для определения аппроксимационных зависимостей с соответствующими параметрами для получения характеристик материала при растяжении и сжатии:

$$\omega = \frac{A}{A_*}, \quad \bar{\tau} = \frac{t}{t_*}, \quad \varepsilon^c = \frac{A}{\sigma}. \quad (7)$$

Здесь

$$A = \frac{f(\sigma)}{\varphi(\sigma)} [1 - (1 - (\alpha+1)(m+1)\varphi(\sigma)t)^{1/(m+1)}]^{1/(\alpha+1)}, \quad A_* = \frac{f(\sigma)}{\varphi(\sigma)}.$$

Аналогичные соотношения имеют место для сдвиговых характеристик, получаемых с использованием метода характеристических параметров [15] в случае кручения круглых тонкостенных образцов при малых деформациях и сплошных образцов при больших деформациях [16]. При этом соотношения записываются с использованием касательных напряжений $\hat{\tau}$ и сдвиговых деформаций ползучести $\hat{\gamma}^c$ в характеристической точке, либо может быть применен другой приближенный подход, основанный на использовании средней по объему тела энергии диссипации [17, 18] в предположении равенства работ внешних и внутренних сил.

Полученные аналитические решения (7), описывающие процессы ползучести и длительной прочности материалов, имеющих три стадии ползучести, с использованием скалярного параметра поврежденности, определяемого нормированной работой рассеяния энергии при ползучести, а также проведенные в последнее время экспериментально-теоретические исследования, посвященные обоснованию энергетического варианта теории длительной прочности (ЭВТДП) [6, 8, 17] и его проверке в случае нарушения энергетического критерия разрушения, позволили конкретизировать кинетические уравнения Работнова в энергетической форме [7] с использованием одних и тех же функций повреждаемости в обоих уравнениях и разработать методику определения функций, входящих в определяющие уравнения ползучести и повреждаемости.

Предложенный простейший вариант кинетических уравнений в энергетической форме [18, 19] для материалов, у которых исходные кривые ползучести при постоянных

напряжениях подобны в координатах $t - \omega$, позволяет обобщить ЭВТДП О. В. Соснина [6, 8, 17] на случай, когда энергетическое условие длительной прочности не выполняется: $A_*(\sigma) \neq \text{const}$. Для построения единой кривой ползучести при одноосном нагружении (деформировании) нормирование исходных диаграмм ползучести осуществляется путем деления текущих экспериментальных значений ε^c на экспериментальные значения в момент разрушения t_* .

Считая, что работа внутренних напряжений при деформировании в процессе ползучести затрачена на разрушение материала, согласно [17] будем полагать, что поврежденность материала равна нормированной удельной работе рассеяния: $\omega = A/A_*$. Не выясняя, какой из механизмов (ползучесть или разрушение) является определяющим, для построения феноменологической теории примем следующие гипотезы.

1. В условиях ползучести материал считается несжимаемым вплоть до разрушения: $\dot{\varepsilon}_{ij}^c \delta_{ij} = 0$, $i = 1, 2, 3$, $j = 1, 2, 3$ (δ_{ij} — символы Кронекера).

2. Процессы ползучести и разрушения происходят одновременно и влияют друг на друга.

3. Интенсивность процесса ползучести оценивается величиной удельной мощности рассеяния энергии $W = \sigma_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}^c$, в качестве меры поврежденности материала принимается величина нормированной удельной диссипации энергии

$$\omega = \int_0^t \sigma_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}^c dt / \int_0^{t_*} \sigma_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}^c dt.$$

4. Считается, что при постоянной температуре и напряженном состоянии одного вида исходные кривые ползучести, представленные в нормированных координатах, сводятся в единую кривую, т. е. подобны в координатах $t - \omega$.

5. В соответствии с ЭВТДП интенсивность процесса деформирования металлических материалов определяется двумя кинетическими уравнениями с одной и той же функцией повреждаемости

$$W \equiv \frac{dA}{dt} = \frac{f(\sigma_\varepsilon)}{\psi(\omega)}, \quad \frac{d\omega}{dt} = \frac{\varphi(\sigma_{*\varepsilon})}{\psi(\omega)}.$$

Здесь σ_ε — эквивалентное напряжение, которое при различных напряженных состояниях обеспечивает одно и то же значение мощности рассеяния энергии в начальный момент (на установившейся стадии ползучести (при ее наличии) W_{\min}); эквивалентное напряжение $\sigma_{*\varepsilon}$ определяется как функция напряженных состояний, при которых в стационарных условиях нагружения скорость накопления повреждений и длительность до разрушения t_* одни и те же. Условие справедливости гипотезы единой кривой для исходных кривых ползучести при одноосном нагружении, представленных в нормированных координатах $\bar{t} - \omega$, определяет область применимости кинетических уравнений ползучести и повреждаемости с одними и теми же функциями повреждаемости в обоих уравнениях.

6. Предполагается справедливым ассоциированный закон течения вплоть до разрушения $\dot{\varepsilon}_{ij}^c = \lambda \partial \sigma_\varepsilon / \partial \sigma_{ij}$.

Следует отметить, что при постоянных напряжениях в экспериментах при одноосном нагружении $\omega = A/A_*$ ($\omega \equiv \varepsilon^c / \varepsilon_*^c$), при формальной замене A на ε^c приведенные выше рассуждения справедливы для уравнений в обозначениях деформация — напряжение [4]. Таким образом, экспериментальную проверку непротиворечивости полученных уравнений следует проводить в нормированных переменных $\omega = A/A_*$ ($\omega \equiv \varepsilon^c / \varepsilon_*^c$), $\bar{t} = t/t_*$.

2. Экспериментально-теоретическая проверка основных гипотез. С использованием гипотезы единой кривой для анализа экспериментальных кривых ползучести при

постоянных напряжениях в нормированных координатах $\bar{\tau}-\omega$ (или в координатах $t-\omega$) проводится экспериментальное обоснование записи кинетических уравнений в виде (5).

Для предлагаемой системы кинетических уравнений ползучести и повреждаемости с одними и теми же функциями при параметре поврежденности в обоих уравнениях (5) разработана единая методика определения функциональных зависимостей [20]. Указанная система уравнений использована в расчетах типовых элементов конструкций с неоднородным напряженно-деформированным состоянием [15, 18–21] для материалов, свойства ползучести которых в нормированных координатах $\bar{\tau} - \omega$ описываются единой кривой. При ползучести в случае одноосного нагружения единые кривые, используемые для определения свойств материала при растяжении, сжатии и кручении, описываются выражением (5).

В работах [17–29] представлены результаты исследования деформирования для разупрочняющихся материалов АК4-1Т, В95пчТ2, Д16Т, 1161, 1163Т, ОТ-4, ВТ-20, ВТ-9, Ст. 45, ВЛ-1Д, 1Х18Н10Т, алюмолитиевых сплавов 1420, 1450 при различных температурах старения, возврата, отжига, закалки, сверхпластичности и материалов с упрочнением, а именно титановых сплавов ЗВ и 17. Выполнен расчет деформирования типовых элементов конструкций (изгиб балок, тавров, кручение валов, пластин и оребренных панелей одинарной и двойной кривизны), проведено сравнение полученных результатов с экспериментальными данными, которое показало, что они удовлетворительно согласуются.

Уравнения (6) обобщаются на случай пространственного напряженного состояния путем замены σ на эквивалентное напряжение σ_{ε} (функция инвариантов тензора напряжений и тензора анизотропии свойств ползучести), но эквивалентные напряжения в уравнениях ползучести и повреждаемости различны.

Экспериментально подтверждена непротиворечивость градиентного закона течения $\dot{\varepsilon}_{kl}^c = \lambda \partial \sigma_{\varepsilon} / \partial \sigma_{kl}$. При описании процессов ползучести и разрушения материалов в энергетических величинах система уравнений может быть представлена в виде

$$\frac{dA}{dt} = \frac{f(\sigma_{\varepsilon}, T)}{\omega^{\alpha}(1 - \omega^{\alpha+1})^m}, \quad A = \int_0^t \sigma_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}^c dt, \quad \dot{\varepsilon}_{kl}^c = \lambda \frac{\partial \sigma_{\varepsilon}}{\partial \sigma_{kl}},$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{f(\sigma_{\varepsilon^*}, T)}{\omega^{\alpha}(1 - \omega^{\alpha+1})^m}.$$
(8)

Вычислим параметры функциональных зависимостей определяющих уравнений ползучести со скалярным параметром поврежденности при растяжении для изотропного разупрочняющегося материала с одними и теми же свойствами при растяжении и сжатии.

На рис. 1 приведены результаты экспериментов на растяжение образцов из стали марки Ст. 45, вырезанных в осевом направлении из прутка диаметром 42 мм при температурах, приведенных в табл. 1. При $T = 740$ °С накопление повреждений ω в материале происходит почти без его упрочнения и разупрочнения вплоть до начала разрушения ($m = 0,5$, $\alpha = 0$).

На рис. 2–5 представлены результаты экспериментов на растяжение образцов из разупрочняющегося титанового сплава ВТ-9 (пруток диаметром 50 мм) в диапазоне температур, близких к температуре сверхпластичности. Точки соответствуют экспериментальным значениям, линии — результаты аппроксимации по уравнениям (5), (6) при значениях параметров, приведенных в табл. 2. При больших деформациях, превышающих 2 %, в экспериментах после каждого приращения осевой деформации на величину $\Delta \varepsilon \approx 0,5$ % с использованием условия несжимаемости материала при ползучести определялась площадь сечения образца и корректировалась осевая нагрузка для поддержания напряжения постоянным.

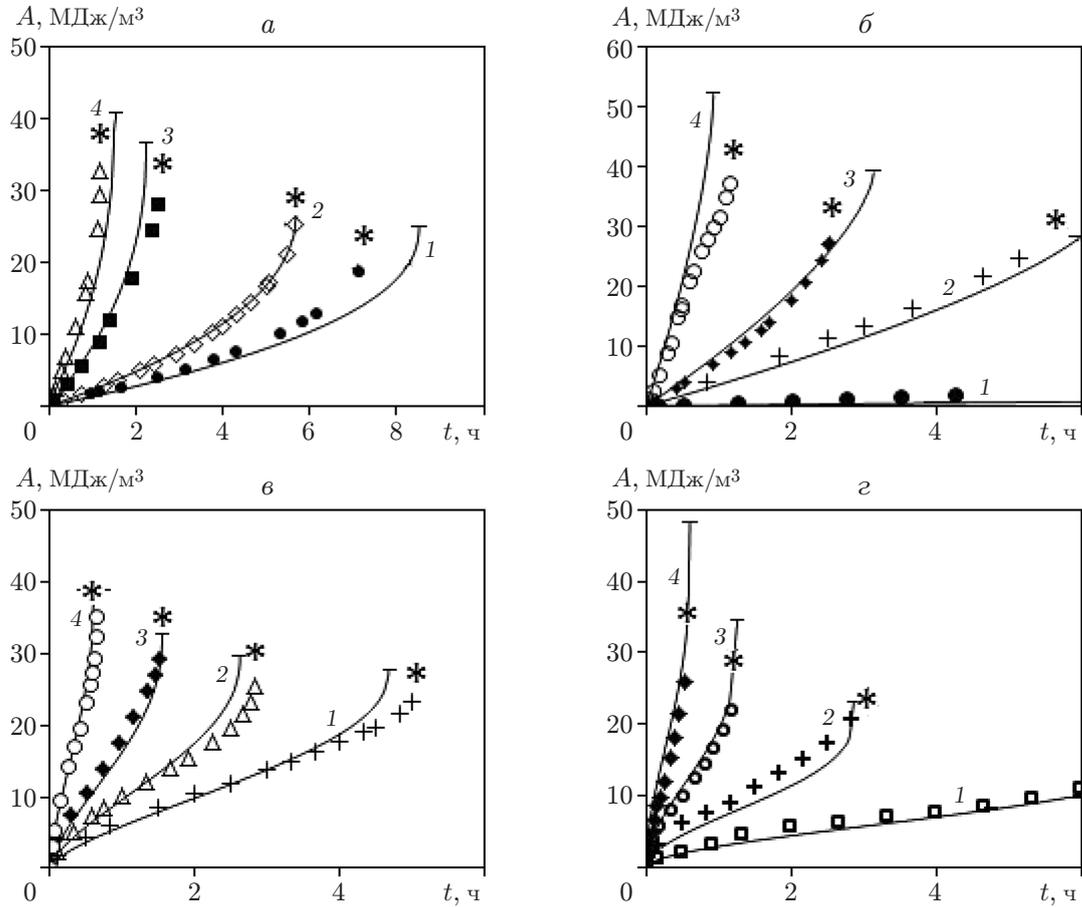


Рис. 1. Экспериментальные (точки) и аппроксимационные (линии) диаграммы ползучести при растяжении для стали марки Ст. 45 при $\sigma = \text{const}$, $T = \text{const}$:
 а — $T = 725^\circ\text{C}$ (1 — $\sigma = 40$ МПа, 2 — $\sigma = 44$ МПа, 3 — $\sigma = 55$ МПа, 4 — $\sigma = 60$ МПа),
 б — $T = 740^\circ\text{C}$ (1 — $\sigma = 30$ МПа, 2 — $\sigma = 45$ МПа, 3 — $\sigma = 50$ МПа, 4 — $\sigma = 60$ МПа),
 в — $T = 750^\circ\text{C}$ (1 — $\sigma = 50$ МПа, 2 — $\sigma = 55$ МПа, 3 — $\sigma = 60$ МПа, 4 — $\sigma = 70$ МПа),
 з — $T = 850^\circ\text{C}$ (1 — $\sigma = 35$ МПа, 2 — $\sigma = 40$ МПа, 3 — $\sigma = 45$ МПа, 4 — $\sigma = 50$ МПа);
 звездочки — моменты разрушения образцов

Таблица 1

Характеристики ползучести стали марки Ст. 45

$T, ^\circ\text{C}$	$B_A, \text{МПа}^{-n} \cdot \text{с}^{-1}$	$B_\omega, \text{МПа}^{-k} \cdot \text{с}^{-1}$	n	k	α	m
725	$7,97 \cdot 10^{-13}$	$1,78 \cdot 10^{-13}$	4,40	4,20	0	1,30
740	$2,13 \cdot 10^{-17}$	$2,74 \cdot 10^{-16}$	7,26	6,67	0	0,50
750	$1,27 \cdot 10^{-16}$	$8,26 \cdot 10^{-16}$	6,36	6,05	0,531	1,47
850	$9,97 \cdot 10^{-20}$	$9,69 \cdot 10^{-17}$	8,71	6,96	0,849	2,83

Таблица 2

Характеристики ползучести титанового сплава ВТ-9

Номер рисунка	$T, ^\circ\text{C}$	$B_A, \text{МПа}^{-n} \cdot \text{с}^{-1}$	$B_\omega, \text{МПа}^{-k} \cdot \text{с}^{-1}$	n	k	α	m
2,а	700	$1,73 \cdot 10^{-18}$	$5,70 \cdot 10^{-15}$	5,60	4,25	0	2,0
2,б	800	$2,39 \cdot 10^{-14}$	$1,55 \cdot 10^{-10}$	4,58	2,90	0	2,5
2,в	900	$1,02 \cdot 10^{-12}$	$1,99 \cdot 10^{-9}$	4,10	3,23	0	1,7
2,г	1000	$6,12 \cdot 10^{-9}$	$1,68 \cdot 10^{-8}$	4,30	3,93	0	0,2
3,а	750	$5,85 \cdot 10^{-15}$	$2,86 \cdot 10^{-12}$	4,60	3,40	0	2,0
3,б	950	$8,78 \cdot 10^{-10}$	$7,87 \cdot 10^{-9}$	4,30	3,30	0	1,6

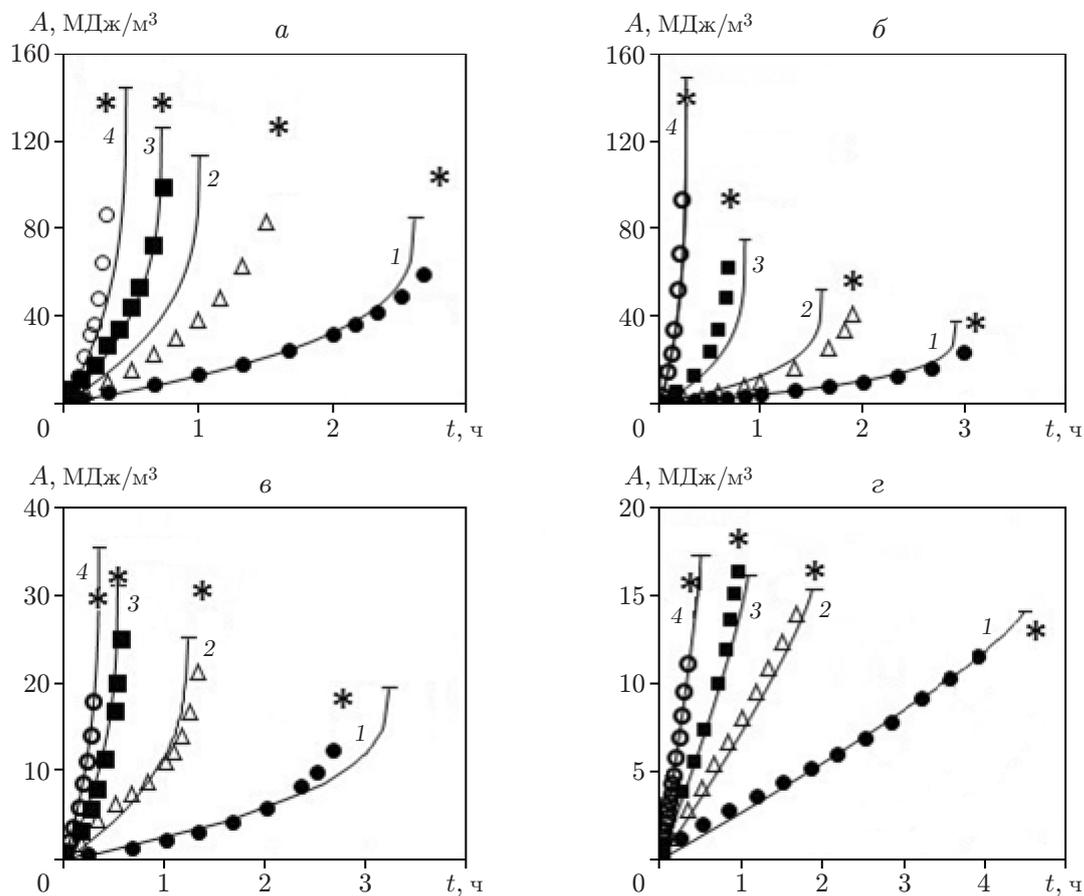


Рис. 2. Экспериментальные (точки) и аппроксимационные (линии) диаграммы ползучести при растяжении для титанового сплава ВТ-9 при $\sigma = \text{const}$, $T = \text{const}$:

а — $T = 700^\circ\text{C}$ (1 — $\sigma = 200$ МПа, 2 — $\sigma = 250$ МПа, 3 — $\sigma = 270$ МПа, 4 — $\sigma = 300$ МПа), б — $T = 800^\circ\text{C}$ (1 — $\sigma = 65$ МПа, 2 — $\sigma = 80$ МПа, 3 — $\sigma = 100$ МПа, 4 — $\sigma = 150$ МПа), в — $T = 900^\circ\text{C}$ (1 — $\sigma = 20$ МПа, 2 — $\sigma = 27$ МПа, 3 — $\sigma = 35$ МПа, 4 — $\sigma = 40$ МПа), г — $T = 1000^\circ\text{C}$ (1 — $\sigma = 8$ МПа, 2 — $\sigma = 10$ МПа, 3 — $\sigma = 11,5$ МПа, 4 — $\sigma = 14$ МПа); звездочки — моменты разрушения образцов

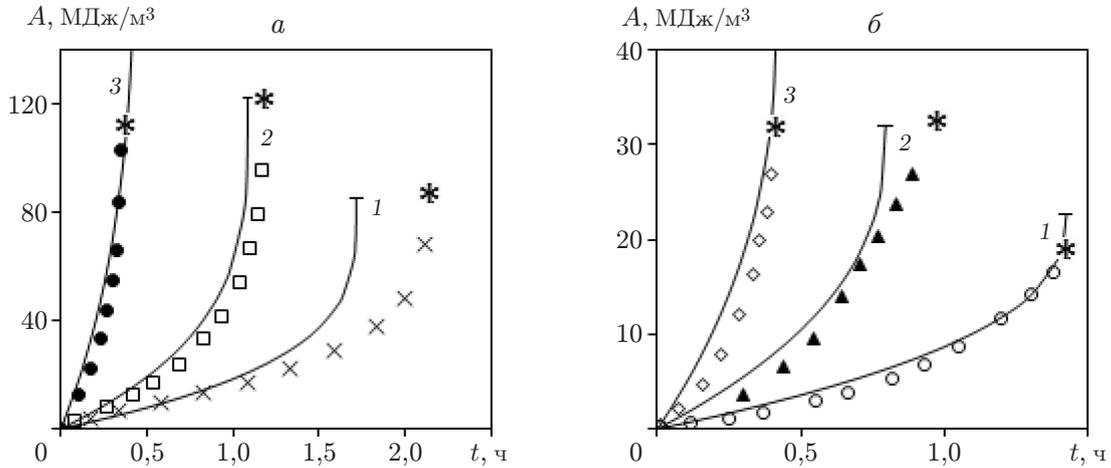


Рис. 3. Экспериментальные (точки) и расчетные (линии) диаграммы ползучести при растяжении для титанового сплава ВТ-9 при $\sigma = \text{const}$, $T = \text{const}$:
 а — $T = 750 \text{ }^\circ\text{C}$ (1 — $\sigma = 130 \text{ МПа}$, 2 — $\sigma = 160 \text{ МПа}$, 3 — $\sigma = 200 \text{ МПа}$), б — $T = 950 \text{ }^\circ\text{C}$ (1 — $\sigma = 15 \text{ МПа}$, 2 — $\sigma = 18 \text{ МПа}$, 3 — $\sigma = 22 \text{ МПа}$); звездочки — моменты разрушения образцов

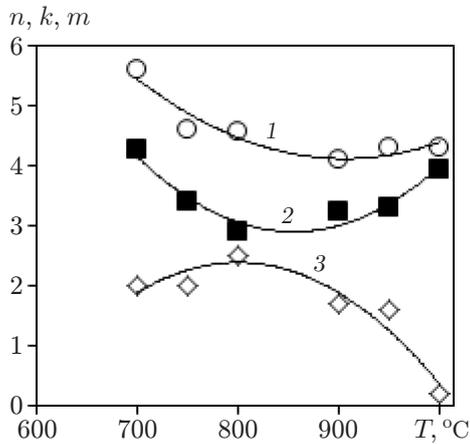


Рис. 4

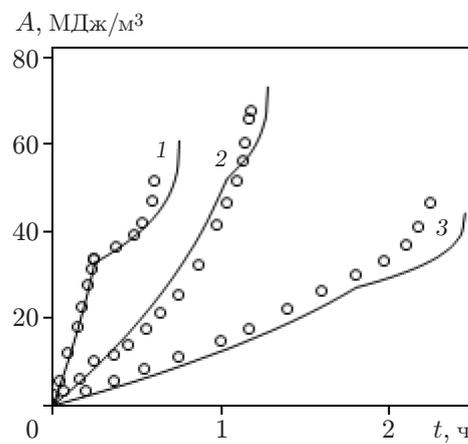


Рис. 5

Рис. 4. Зависимости параметров n (1), k (2), m (3) от температуры для титанового сплава ВТ-9

Рис. 5. Экспериментальные (точки) и расчетные (линии) зависимости $A(t)$ для титанового сплава ВТ-9 при различных значениях σ , T :

- 1 — $T = 700 \text{ }^\circ\text{C}$, $\sigma = 300 \text{ МПа}$, перегрузка при $t_1 = 15 \text{ мин}$ ($T = 950 \text{ }^\circ\text{C}$, $\sigma = 18 \text{ МПа}$);
- 2 — $T = 750 \text{ }^\circ\text{C}$, $\sigma = 150 \text{ МПа}$, перегрузка при $t_2 = 62 \text{ мин}$ ($T = 950 \text{ }^\circ\text{C}$, $\sigma = 18 \text{ МПа}$);
- 3 — $T = 700 \text{ }^\circ\text{C}$, $\sigma = 200 \text{ МПа}$, перегрузка при $t_3 = 108 \text{ мин}$ ($T = 950 \text{ }^\circ\text{C}$, $\sigma = 15 \text{ МПа}$)

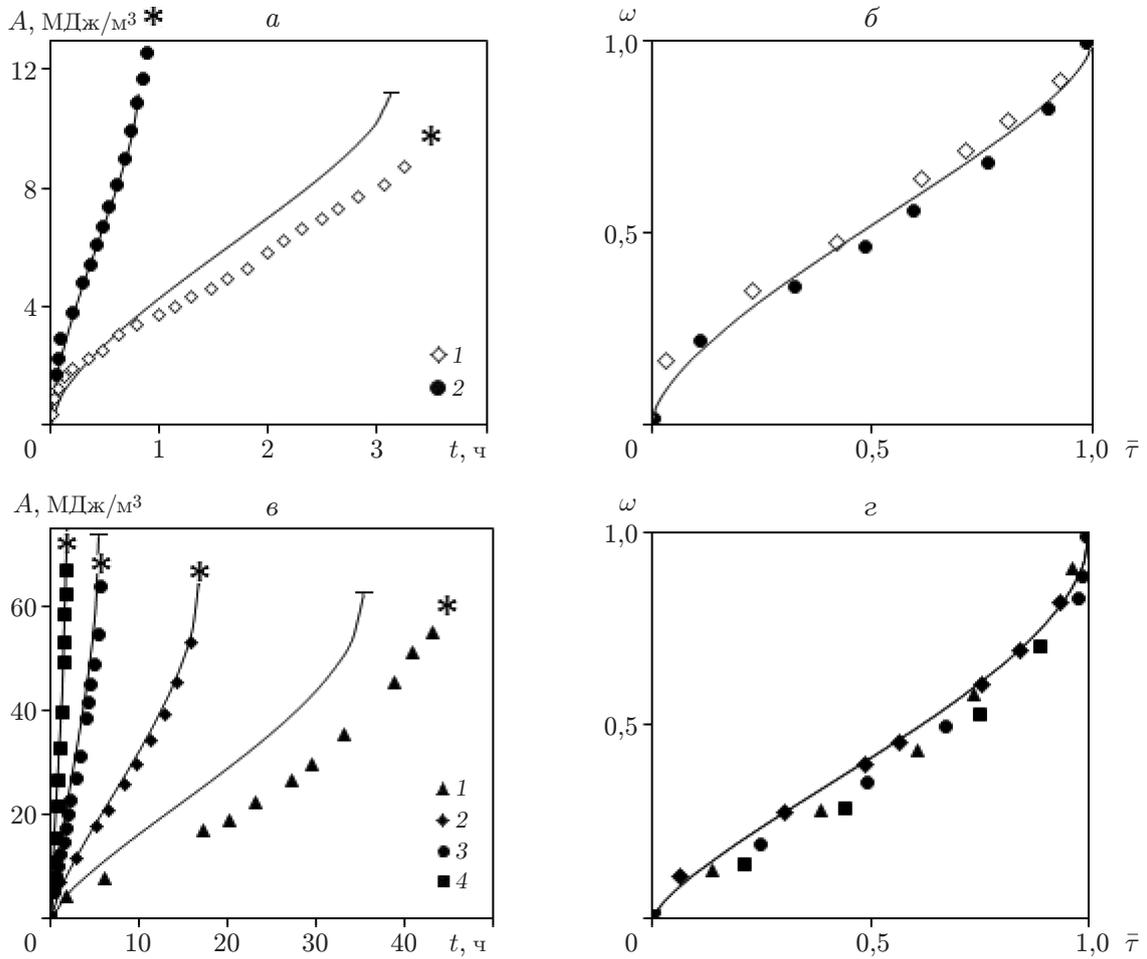


Рис. 6. Экспериментальные (точки) и расчетные (линии) зависимости $A(t)$ (а, в) и $\omega(\bar{\tau})$ (б, г) для стали марки ЖС6У при $T = 925 \text{ }^\circ\text{C}$:
 а, б — в случае растяжения (1 — $\sigma = 470 \text{ МПа}$, 2 — $\sigma = 520 \text{ МПа}$), в, г — в случае сжатия (1 — $\sigma = 450 \text{ МПа}$, 2 — $\sigma = 480 \text{ МПа}$, 3 — $\sigma = 530 \text{ МПа}$, 4 — $\sigma = 580 \text{ МПа}$);
 звездочки — моменты разрушения образцов

Таблица 3

Характеристики ползучести стали марки ЖС6У

Напряженное состояние	$B_A, \text{ МПа}^{-n} \cdot \text{с}^{-1}$	$B_\omega, \text{ МПа}^{-k} \cdot \text{с}^{-1}$	n	k	α	m
Растяжение	$2,18 \cdot 10^{-36}$	$1,95 \cdot 10^{-37}$	13,4	13,4	0,6	0,55
Сжатие	$4,31 \cdot 10^{-34}$	$3,11 \cdot 10^{-33}$	12,5	11,5	0,4	1,20

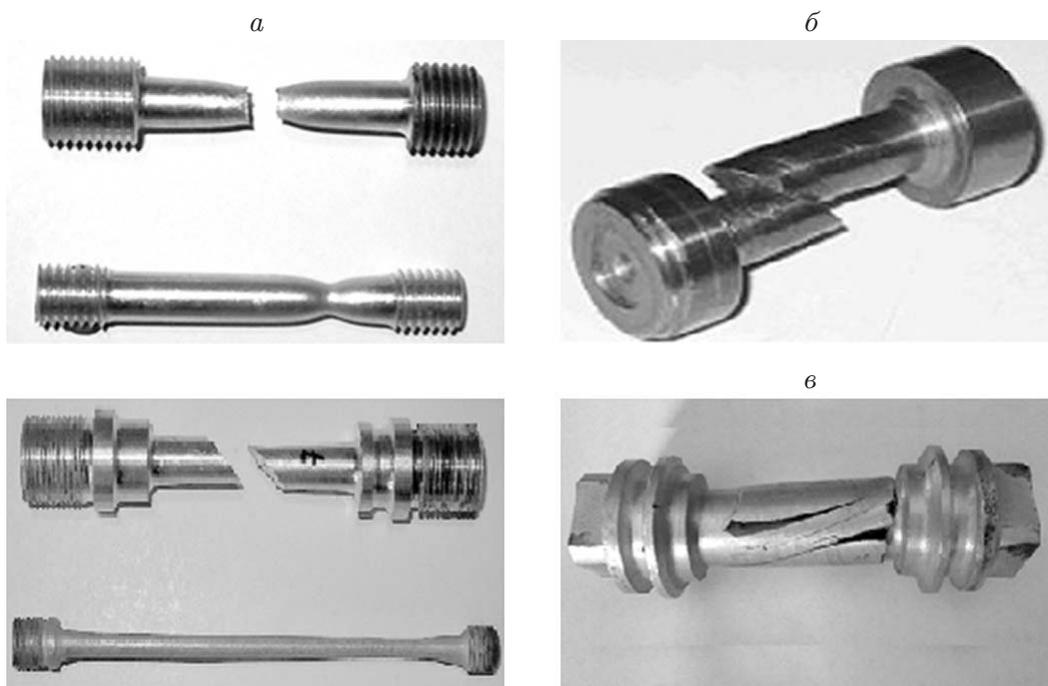


Рис. 7. Разрушение образцов при различных напряженных состояниях:
a — растяжение, *б* — сжатие, *в* — кручение

Из приведенных на рис. 2, 3 результатов следует, что при постоянных T , σ и больших деформациях, достигающих 100 %, также существует единая кривая при напряжениях, не превышающих предела упругости σ_e , т. е. исходные кривые ползучести подобны в координатах $t - \omega$. На рис. 4 точками показаны зависимости параметров n , k , m от T при постоянном значении σ , на рис. 5 — экспериментальные и расчетные зависимости $A(t)$ для титанового сплава ВТ-9 при различных значениях σ , T .

На рис. 6 представлены зависимости работы рассеяния от времени и параметра поврежденности от приведенного времени для стали марки ЖС6У при $T = 925$ °С в случае растяжения и сжатия образцов. Из этих зависимостей следует, что единые кривые при растяжении и сжатии различны. Для материалов с различным видом разупрочнения при растяжении и сжатии, подобных стали марки ЖС6У, следует продолжить моделирование процессов ползучести и разрушения и провести сравнение полученных результатов с экспериментальными данными.

В табл. 3 приведены значения аппроксимационных коэффициентов при растяжении и сжатии стали марки ЖС6У при $T = 925$ °С.

На рис. 7 показаны образцы, разрушенные при растяжении, сжатии и кручении.

3. Выводы. Полученная уточненная система определяющих уравнений в виде (8), вообще говоря, накладывает достаточно жесткие требования на область их применимости. Необходимо проверять подобие исходных кривых деформирования материала в условиях ползучести вплоть до разрушения в переменных время — поврежденность материала. Процесс деформирования в режиме ползучести должен полностью определяться текущими значениями напряжения и параметра поврежденности материала.

Возможность использования уточненной системы уравнений с одним скалярным параметром поврежденности должна быть проверена в широком температурно-временном диапазоне для различных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Никитенко А. Ф., Соснин О. В., Торшенов Н. Г., Шокало И. К.** О прочностных особенностях титановых сплавов // ПМТФ. 1976. № 6. С. 118–122.
2. **Горев Б. В., Масанов И. Ж.** Особенности деформирования листов и плит из алюминиевых сплавов в режимах ползучести // Технология машиностроения. 2009. № 7. С. 13–20.
3. **Горев Б. В., Соснин О. В.** Технологические процессы обработки металлов давлением в режимах ползучести и их моделирование // Тр. Междунар. науч.-техн. конф. “Современные металлические материалы и технологии”, Санкт-Петербург, 24–26 июня 2009 г. СПб.: С.-Петербург. гос. политехн. ун-т, 2009. С. 257–269.
4. **Gorev B. V., Klopotov I. D., Lyubashevskaya I. V.** Creep and damage behavior of AK4-1 T and VT-9 alloy under different stress state // Theor. Appl. Fracture Mech. 1998. N 29. P. 1–10.
5. **Ушков С. С., Чашников Д. И.** Термин “сверхпластичность” в широком и узком значениях // Судостроит. пром-сть. Сер. Металловедение. Металлургия. 1990. Вып. 13. С. 11–21.
6. **Соснин О. В.** Энергетический вариант теории ползучести / О. В. Соснин, Б. В. Горев, А. Ф. Никитенко. Новосибирск: Ин-т гидродинамики СО АН СССР, 1986.
7. **Работнов Ю. Н.** Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука, 1988.
8. **Никитенко А. Ф.** Ползучесть и длительная прочность металлических материалов. Новосибирск: Новосиб. гос. архит.-строит. ун-т, 1997.
9. **Горев Б. В., Захарова Т. Э., Клопотов И. Д.** К описанию процесса ползучести и разрушения материалов с немонотонным изменением деформационно-прочностных свойств // Физ. мезомеханика. 2002. Т. 5, № 2. С. 17–22.
10. **Горев Б. В., Масанов И. Ж., Олейников А. И., Пекарш А. И.** Особенности деформационно-прочностного поведения листовых материалов на основе алюминия применительно к формообразованию деталей в режиме ползучести // Материалы 11-го Междунар. симп. “Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред”, Ярополец, 14–18 февр. 2005 г. М.: Моск. авиац. ин-т, 2005. Т. 1. С. 115–117.
11. **Рубанов В. В.** О параметре повреждаемости в условиях ползучести // Неклассические задачи упругости и пластичности. Новосибирск: Ин-т гидродинамики СО АН СССР, 1981. Вып. 49. С. 151–156.
12. **Астафьев В. И.** О диссипативном критерии разрушения при ползучести // ПМТФ. 1983. № 4. С. 167–170.
13. **Цвелодуб И. Ю.** Постулат устойчивости и его приложения в теории ползучести металлических материалов. Новосибирск: Ин-т гидродинамики СО РАН, 1991.
14. **Соснин О. В., Шокало И. К.** Энергетический вариант теории ползучести и длительной прочности. 2. Ползучесть и разрушение материалов с начальным упрочнением // Пробл. прочности. 1974. № 1. С. 43–48.
15. **Горев Б. В.** К оценке ползучести и длительной прочности элементов конструкций по методу характеристических параметров // Пробл. прочности. 1979. № 4. С. 30–36.
16. **Горев Б. В., Коробейников С. Н.** К определению сдвиговой деформации металлических материалов в условиях ползучести // Тр. 2-й Междунар. конф. “Актуальные проблемы механики сплошной среды”, Дилижан, 4–8 окт. 2010 г. Ереван: ЕГУАС, 2010. Т. 1. С. 187–191.
17. **Соснин О. В., Никитенко А. Ф., Горев Б. В.** К обоснованию энергетического варианта теории ползучести и длительной прочности металлов // ПМТФ. 2010. Т. 51, № 4. С. 188–197.
18. **Любашевская И. В., Горев Б. В., Панамарев В. А.** Вариант кинетических уравнений ползучести и повреждаемости с энергетическим параметром поврежденности // Вестн. Нижегород. ун-та им. Н. И. Лобачевского. 2011. Ч. 5, № 4. С. 2321–2323.

19. **Горев Б. В., Любашевская И. В.** К методике определения функциональных зависимостей кинетических уравнений для описания разрушения при ползучести // Материалы 9-й Междунар. конф. по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ' 2012), Алушта, 25–31 мая 2012 г. М.: Моск. авиац. ин-т, 2012. С. 337–339.
20. **Ларичкин А. Ю., Горев Б. В.** Построение сдвиговых деформаций ползучести из чистого кручения сплошных круглых валов // Науч.-техн. ведомости С.-Петербур. гос. политехн. ун-та. Физ.-мат. науки. 2013. Вып. 3. С. 212–219.
21. **Горев Б. В.** Высокотемпературная ползучесть конструкционных сплавов и ее приложение к формообразованию крупногабаритных деталей: Дис. . . . д-ра техн. наук. Новосибирск, 2003.
22. **Коробейников С. Н., Олейников А. И., Горев Б. В., Бормотин К. С.** Математическое моделирование процессов ползучести металлических изделий из материалов, имеющих разные свойства при растяжении и сжатии // Вычисл. методы и программирование. 2008. Т. 9, № 2. С. 160–179.
23. **Банщикова И. А., Горев Б. В., Цвелодуб И. Ю.** О ползучести пластин из алюминиевых сплавов при изгибе // ПМТФ. 2007. Т. 48, № 5. С. 156–159.
24. **Горев Б. В., Банщикова И. А.** К описанию ниспадающего участка кривой деформирования “напряжение — деформация” по кинетическим уравнениям со скалярным параметром поврежденности // Вестн. Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки. 2008. № 2. С. 1–4.
25. **Горев Б. В., Банщикова И. А.** К описанию процесса ползучести и разрушения упрочняющихся материалов по кинетическим уравнениям со скалярным параметром поврежденности // Вестн. Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки. 2009. № 2. С. 1–7.
26. **Цвелодуб И. Ю.** К построению определяющих уравнений ползучести ортотропных материалов с различными свойствами при растяжении и сжатии // ПМТФ. 2012. Т. 53, № 6. С. 98–101.
27. **Горев Б. В., Панамарев В. А.** Метод интегральных характеристик для расчетов изгиба элементов конструкций // Науч.-техн. ведомости С.-Петербур. гос. политехн. ун-та. Физ.-мат. науки. 2013. Вып. 3 С. 268–273.
28. **Горев Б. В., Панамарев В. А., Любашевская И. В.** К обоснованию кинетических уравнений ползучести и повреждаемости в энергетической форме для описания техпроцесса деформирования современных конструкционных материалов // Современные металлические материалы и технологии (СММ'2013): Тр. 10-й Междунар. науч.-техн. конф., Санкт-Петербург, 25–29 июня 2013 г. СПб.: С.-Петербур. гос. политехн. ун-т, 2013. С. 5–11.
29. **Ларичкин А. Ю., Горев Б. В.** К методике определения параметров уравнений ползучести для расчета чистого кручения круглых валов из экспериментов на растяжение и сжатие // Тр. 4-й Всерос. конф. “Безопасность и живучесть технических систем”, Красноярск, 9–13 окт. 2012 г. Красноярск: СКТБ “Наука”, 2012. Т. 1. С. 154–159.

*Поступила в редакцию 3/ХІІ 2013 г.,
в окончательном варианте — 3/ІІ 2014 г.*
