

УДК 539.376+539.4

К ОБОСНОВАНИЮ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ВАРИАНТА ТЕОРИИ ПОЛЗУЧЕСТИ И ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ МЕТАЛЛОВ

О. В. Соснин, А. Ф. Никитенко, Б. В. Горев

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск
E-mails: naf@hydro.nsc.ru, gorev@yandex.ru

Сформулированы и экспериментально подтверждены гипотезы, положенные в основу энергетического варианта теории ползучести и длительной прочности металлов.

Ключевые слова: ползучесть, разрушение, параметр поврежденности, тензоры напряжений и скоростей деформации ползучести.

Введение. В современном машиностроении применяются качественно новые ресурсосберегающие технологии формообразования с изменяющимися температурно-скоростными параметрами процесса. Для использования в промышленности нетрадиционных методов обработки металлов давлением при медленных режимах деформирования, когда существенную роль играет продолжительность процесса, необходима научно-техническая проработка подходов к моделированию процессов деформирования. Эффективным способом повышения точности формообразования без применения ручных работ является использование разрабатываемых в последние годы способов деформирования, основанных на медленных температурно-силовых воздействиях на металл. В таких процессах основной вклад в общую необратимую деформацию вносят деформации ползучести. Несмотря на невысокие скорости деформирования, эти процессы обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными процессами быстрого холодного и горячего формоизменения [1]. При обработке высокопрочных, труднодеформируемых и малопластичных материалов возникает ряд трудностей, обусловленных тем, что деталь еще на стадии изготовления с использованием традиционных методов формообразования может исчерпать свой эксплуатационный ресурс. Деформирование в режиме ползучести позволяет получать большие деформации при значительно меньших усилиях. Существенное увеличение точности изготовления деталей в режимах ползучести способствует уменьшению объема ручных работ.

При оценке эффективности элементов конструкций и расчете технологических процессов актуальны исследование и моделирование деформационно-прочностных особенностей поведения конструкционных сплавов с использованием экспериментально обоснованных кинетических уравнений ползучести и повреждаемости. В работе [2] для случая одноосного напряженного состояния сформулирована теория ползучести, основанная на гипотезе существования уравнения состояния с системой дифференциальных уравнений для параметров, описывающих с феноменологических позиций изменение структуры материала вследствие накопления в нем повреждений. Эта теория получила название кинетической [3]. В работах [4, 5] предложен конкретный вариант теории ползучести, названный энергетическим, для случая сложного напряженного состояния, указаны используемые при этом гипотезы.

В настоящей работе экспериментально обоснован и развит энергетический вариант кинетической теории ползучести.

Основные гипотезы. При построении энергетического варианта теории ползучести и длительной прочности металлов принимаются следующие гипотезы [5, 6].

1. Материал считается несжимаемым вплоть до момента его разрушения:

$$\eta_{ij}\delta_{ij} = 0, \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (1)$$

(η_{ij} — компоненты тензора скоростей деформаций ползучести; δ_{ij} — символ Кронекера).

Гипотеза (1) имеет экспериментальное подтверждение [6], что позволяет отождествить компоненты тензора скоростей деформаций ползучести с компонентами девиатора этого тензора.

2. Девиаторы тензоров скоростей деформаций ползучести и напряжений полагаются пропорциональными. Эта гипотеза равносильна закону течения, ассоциированному с поверхностью $\sigma_i = \text{const}$:

$$\eta_{kl} = h \frac{\partial \sigma_i}{\partial \sigma_{kl}}. \quad (2)$$

Здесь σ_{kl} — компоненты тензора напряжений; $\sigma_i = \sqrt{3s_{kl}s_{kl}/2}$ — интенсивность напряжений; $s_{kl} = \sigma_{kl} - \sigma_0\delta_{kl}$ — компоненты девиатора тензора напряжений; $\sigma_0 = \sigma_{kl}\delta_{kl}/3$ — гидростатическая составляющая тензора напряжений; h — неотрицательная функция.

Умножая левую и правую части (2) на σ_{kl} , проводя суммирование и учитывая, что σ_i — однородная относительно напряжений функция первой степени, получаем

$$h = W/\sigma_i, \quad (3)$$

где $W = \sigma_{kl}\eta_{kl}$ — удельная мощность рассеяния.

3. Предполагается наличие функциональной зависимости между интенсивностями тензоров напряжений σ_i , деформаций ползучести p_i и их скоростей η_i , причем в случае одноосного напряженного состояния эта зависимость переходит в зависимость между напряжением, деформацией ползучести и ее скоростью, используемую в одной из известных теорий ползучести. Из этого предположения, в частности, следует, что при различных видах напряженного состояния предполагаемая функциональная зависимость между соответствующими интенсивностями одна и та же, т. е. справедлива гипотеза существования единой кривой.

В отличие от традиционного подхода в энергетическом варианте теории ползучести постулируется существование функциональной зависимости между интенсивностью напряжений, удельной работой рассеяния A и удельной мощностью рассеяния W , причем $dA = W dt$ (t — текущее время).

В качестве меры процесса ползучести предлагается использовать удельную работу вместо традиционно используемой интенсивности деформаций p_i , а в качестве меры интенсивности процесса ползучести — удельную мощность рассеяния вместо традиционно используемой интенсивности скоростей η_i .

4. Считается справедливой предложенная Ю. Н. Работновым концепция механического уравнения состояния [2], согласно которой в случае одноосного напряженного состояния скорость ползучести структурно-устойчивого материала в каждый момент времени зависит от величины приложенного в это время напряжения, температуры и структурного состояния материала в тот же момент времени.

В случае сложного напряженного состояния предлагается следующая формулировка уравнения состояния: интенсивность процесса ползучести структурно-устойчивого материала в каждый момент времени есть функция интенсивности напряжений, температуры θ и структурного состояния материала:

$$W = W(\sigma_i, \theta, A, \omega_1, \omega_2, \dots, \omega_k) \quad (4)$$

($\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_k$ — параметры, описывающие с феноменологических позиций изменение структуры материала, обусловленное накоплением в нем повреждений).

5. В соответствии с работой [2] параметры $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_k$ отождествляются с параметрами поврежденности. Далее ограничимся одним параметром, кинетическое уравнение для которого запишем в виде

$$\frac{d\omega}{dt} = F(\sigma_i, \theta, A, \omega), \quad \omega(x_k, 0) = 0, \quad \omega(x_k^*, t_*) = 1. \quad (5)$$

Считается, что в случае неповрежденного материала параметр ω во всех точках тела равен нулю; если в какой-либо точке с координатами x_k^* в момент времени $t = t_*$ он достигает значения, равного единице, то говорят, что в этой точке произошло разрушение, а время t_* называют временем начала разрушения тела.

Из (5) следует, что

$$t_* = \psi(\sigma_i). \quad (6)$$

Очевидно, что в (6) интенсивность напряжений является критерием длительной прочности.

Кинетическая теория ползучести и длительной прочности, представленная системой уравнений (1)–(6), получила экспериментальное обоснование для ряда металлов в широком интервале нагрузок и температур в условиях как простого, так и сложного нагружения.

Подтверждение основных гипотез. Экспериментальные исследования выполнены для ряда алюминиевых, титановых сплавов и сплавов на основе железа в условиях одноосного растяжения, сжатия, чистого кручения, плоского напряженного состояния при стационарных и переменных внешних нагрузках в широком интервале температур [5–7]. В частности, показано [7], что если построить графики удельной работы рассеяния как функции времени t для ряда фиксированных напряжений (рассматривается случай одноосного растяжения при постоянной температуре), то легко обнаружить их геометрическое подобие, а именно: если для некоторого напряжения σ_k имеем $A = A(t)$, то для любого другого напряжения σ_j получим $A = A(k_j t)$, т. е., изменяя масштаб времени в k_j раз, кривые удельной работы рассеяния для различных напряжений можно свести в единую кривую на всех этапах ползучести материала начиная с момента приложения нагрузки практически до момента разрушения. Установлено, что коэффициент k_j приблизительно равен отношению времени разрушения образца при напряжении σ_j ко времени разрушения при напряжении σ_k . На рис. 1 показана единая кривая удельной работы рассеяния сплава ВТ9 при температуре испытания 600 °С и различных напряжениях в условиях сжатия и растяжения.

На рис. 2 показаны кривые удельной работы рассеяния, полученные в условиях плоского напряженного состояния при температуре 450 °С для тонкостенных трубчатых образцов, изготовленных из стали марки Ст. 45; там же на плоскости $\sigma - \sqrt{3}\tau$ (τ — касательное напряжение) сплошными линиями показаны кривые эквивалентных напряженных состояний, различными точками отмечены напряженные состояния, при которых проводились эксперименты. Следует отметить, что кривые эквивалентных напряженных состояний представляют собой окружности Мизеса, т. е. $\sigma_i = \text{const}$.

Результаты анализа экспериментальных данных, представленных на рис. 2, позволяют сделать следующие выводы:

— единая кривая удельной работы рассеяния не зависит от вида напряженного состояния и является функцией только уровня напряженного состояния и времени, т. е. $A = A(\sigma_i, t)$;

— как и в случае одноосного напряженного состояния, кривые удельной работы рассеяния геометрически подобны, а именно: если для некоторого уровня интенсивности на-

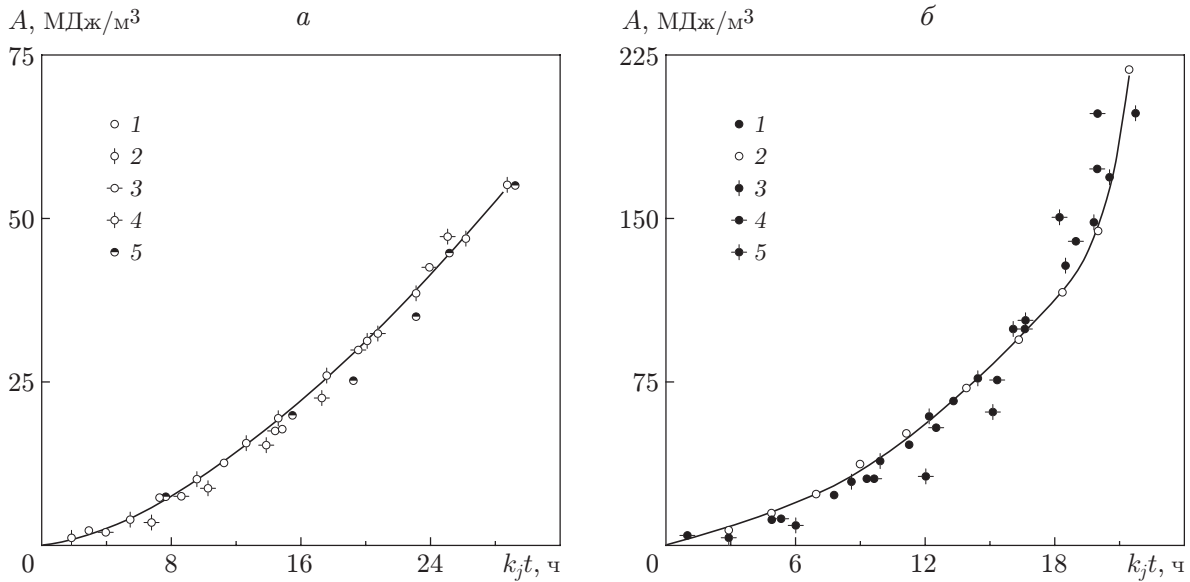


Рис. 1. Единая кривая удельной работы рассеяния в процессе ползучести сплава ВТ9 при температуре $\theta = 600\text{ }^\circ\text{C}$ и различных значениях напряжения в условиях сжатия (а) и растяжения (б):

а — 1 — $\sigma_1 = -150\text{ МПа}$, $k_1 = 3,54$; 2 — $\sigma_2 = -250\text{ МПа}$, $k_2 = 1$; 3 — $\sigma_3 = -350\text{ МПа}$, $k_3 = 0,28$; 4 — $\sigma_4 = -450\text{ МПа}$, $k_4 = 0,145$; 5 — $\sigma_5 = -573\text{ МПа}$, $k_5 = 0,026$; б — 1 — $\sigma_1 = 150\text{ МПа}$, $k_1 = 5,6$; 2 — $\sigma_2 = 250\text{ МПа}$, $k_2 = 1$; 3 — $\sigma_3 = 350\text{ МПа}$, $k_3 = 0,35$; 4 — $\sigma_4 = 450\text{ МПа}$, $k_4 = 0,095$; 5 — $\sigma_5 = 550\text{ МПа}$, $k_5 = 0,033$

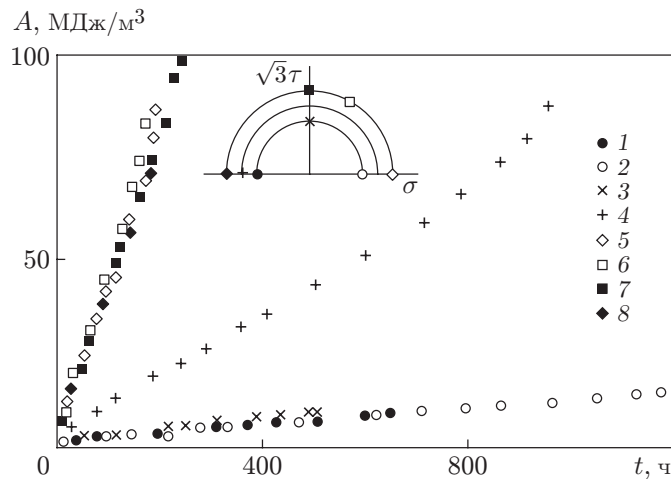


Рис. 2. Единые кривые удельной работы рассеяния в процессе ползучести стали Ст. 45 при $\theta = 450\text{ }^\circ\text{C}$ в условиях плоского напряженного состояния при различных значениях интенсивности напряжений:

1-3 — $\sigma_i = 157\text{ МПа}$ (1 — $\sqrt{3}\tau/\sigma = -0$; 2 — $\sqrt{3}\tau/\sigma = \infty$; 3 — $\sqrt{3}\tau/\sigma = +0$); 4 — $\sigma_i = 206\text{ МПа}$, $\sqrt{3}\tau/\sigma = -0$; 5-8 — $\sigma_i = 235\text{ МПа}$ (5 — $\sqrt{3}\tau/\sigma = +0$; 6 — $\sqrt{3}\tau/\sigma = \sqrt{3}$; 7 — $\sqrt{3}\tau/\sigma = \infty$; 8 — $\sqrt{3}\tau/\sigma = -0$)

пряжений $\sigma_i^{(k)}$ имеет место зависимость $A = A(t)$, то для любого другого уровня интенсивности напряжений $\sigma_i^{(j)}$ получим $A = A(k_j t)$, т. е., изменяя масштаб времени в k_j раз, кривые удельной работы рассеяния при различных значениях σ_i можно свести в единую кривую на всех этапах деформирования материала;

— коэффициент подобия k_j равен отношению времени разрушения образца при интенсивности напряжений $\sigma_i^{(k)}$ ко времени разрушения при интенсивности $\sigma_i^{(j)}$. Времена разрушения вычисляются по формуле (6), т. е.

$$k_j = \psi(\sigma_i^{(k)}) / \psi(\sigma_i^{(j)}).$$

Аналогичные единые кривые имеют место для ряда других материалов при различных значениях интенсивности напряжений и температуры [5–7]. Сказанное выше позволило конкретизировать зависимости (4), (5) и представить их в виде

$$\frac{dA}{dt} = \frac{F_1(\sigma_i, \theta)}{U_1(A)U_2(\omega)}; \quad (7)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{F_2(\sigma_i, \theta)}{U_3(A)U_4(\omega)}, \quad (8)$$

где функциональные зависимости $F_1, F_2, U_1, \dots, U_4$ определяются в экспериментах. Из анализа экспериментальных данных, приведенных на рис. 1, 2 и в работах [5–7], следует, что на всех этапах деформирования с момента приложения нагрузки вплоть до момента разрушения удельная работа рассеяния характеризует эквивалентные состояния материала независимо от температуры, уровня и вида напряженного состояния. Данный экспериментальный результат позволяет отождествить удельную диссипирующую работу с параметром поврежденности и, следовательно, оценивать меру накопленных повреждений в материале в любой момент времени по величине диссипирующей работы. Отметим, что в момент разрушения величина диссипирующей работы $A_* = A(t_*)$ не зависит от температуры, уровня и вида напряженного состояния. Если ввести обозначение $\omega(t) = A(t)/A_*$, то уравнения (7), (8) будут тождественны. В целом кинетическую теорию ползучести (система уравнений (1)–(3), (6)–(8)) принято называть энергетическим вариантом ползучести и длительной прочности, в котором процессы ползучести материала и накопления в нем повреждений рассматриваются как единый процесс.

Перечисленные выше гипотезы получили удовлетворительное экспериментальное обоснование [5, 6]. В ряде случаев эти гипотезы не подтверждаются [5, 6].

Обобщение основных гипотез. Из анализа многочисленных экспериментальных данных, полученных в условиях плоского напряженного состояния, следует, что закон течения, ассоциированный с поверхностью $\sigma_i = \text{const}$, нарушается. Поэтому возникла необходимость корректировки соотношений (2). Примем закон течения, ассоциированный с поверхностью $\sigma_e = \text{const}$:

$$\eta_{ij} = h \frac{\partial \sigma_e}{\partial \sigma_{ij}}.$$

Считая эквивалентное напряжение σ_e однородной относительно напряжений функцией первой степени и определяя, как и выше, функцию h , получаем $h = W/\sigma_e$. Следовательно,

$$\eta_{ij} = \frac{W}{\sigma_e} \frac{\partial \sigma_e}{\partial \sigma_{ij}}. \quad (9)$$

Не нарушая общности, аппроксимируем σ_e в виде, предложенном в [6]:

$$\sigma_e = \sigma_i f(\zeta), \quad f(\zeta) = [1 + \alpha(\sin 3\zeta)^\lambda]^{1/(2\nu)}. \quad (10)$$

На девиаторной плоскости направление вектора интенсивности напряжений определяется углом вида напряженного состояния ζ . Если $f(\zeta) = 1$, то закон течения (9) совпадает с (2).

В экспериментах в условиях плоского напряженного состояния наблюдается систематическое отклонение от закона пропорциональности девиаторов скоростей деформаций ползучести и напряжений. Данный факт имеет следующую геометрическую интерпретацию. Направление вектора скорости деформаций ползучести на девиаторной плоскости характеризуется углом вида φ , направление вектора деформаций ползучести — углом вида ψ . Тогда угол $\omega_\eta = \zeta - \varphi$ представляет собой меру отклонения соответствующих девиаторов от закона пропорциональности. Этот угол принято называть фазой подобия (терминология В. В. Новожилова) [2, 6].

Анализ экспериментальных данных [5, 6], полученных в условиях плоского напряженного состояния для тонкостенных трубчатых образцов, нагружаемых осевой растягивающей или сжимающей силой и одновременно крутящим моментом или внутренним давлением, позволяет сделать следующие выводы.

1. При стационарном напряженном состоянии и в случае простого нагружения ($\zeta(t) = \text{const}$) в любой момент времени вплоть до момента разрушения $\varphi(t) = \psi(t) \neq \zeta(t)$; если считать, что гипотеза подобия соответствующих девиаторов справедлива (отклонение не превышает 10 % [2]), то $\varphi(t) = \psi(t) \approx \zeta(t)$.

2. Экспериментально установлено, что фаза подобия соответствующих девиаторов не зависит от температуры, уровня напряженного состояния и является нечетной функцией только угла вида напряженного состояния.

С использованием выражения (10) тангенс фазы подобия вычисляется по формуле [2]

$$\text{tg } \omega_\eta = -\frac{1}{f(\zeta)} \frac{\partial f}{\partial \zeta}.$$

3. В случае сложного нагружения фаза подобия девиаторов напряжений и скоростей деформаций ползучести непосредственно после излома траектории нагружения получает приращение, которое зависит только от приращения угла вида напряженного состояния; иными словами, $\varphi(t) \neq \psi(t) \neq \zeta(t)$, и происходит “заброс” вектора скорости деформаций ползучести в направлении поворота вектора интенсивности напряжений, причем он тем больше, чем больше приращение угла вида напряженного состояния [5]. С течением времени приращение фазы подобия девиаторов стремится к нулю [5]. Именно этот экспериментальный факт обусловил необходимость корректировки функциональной зависимости (10) для эквивалентного напряжения. В этом случае считаем, что $\sigma_e = \sigma_i F(\zeta, t)$ [6]. Структура функции $F(\zeta, t)$ такова, что при стационарном напряженном состоянии и в случае простого нагружения она вырождается в $f(\zeta)$, а при сложном нагружении стремится со временем к функции $f(\zeta)$ [6].

Приведенные выше результаты экспериментов подтверждают целесообразность формулировки гипотезы существования единой кривой в энергетических переменных и позволяют выявить ее преимущество по сравнению с аналогичной гипотезой, используемой в любых других теориях, особенно в технических теориях ползучести. Действительно, в этих теориях, как сказано выше, интенсивность процесса ползучести оценивается величиной интенсивности скоростей деформаций ползучести η_i . Тогда очевидно, что мерой процесса ползучести является величина

$$p'_i = \int_0^t \eta_i d\tau,$$

представляющая собой известный параметр Одквиста. Однако первичной информацией, свидетельствующей о склонности материалов к ползучести, являются измеряемые в хо-

де эксперимента перемещения, пересчитываемые в соответствующие компоненты тензора деформаций ползучести. Поэтому в качестве меры процесса ползучести используется величина интенсивности деформаций p_i [2–4]. Возникает вопрос об эквивалентности мер процессов ползучести p_i и p'_i . Очевидно, что $dp'_i/dt = \eta_i$, $dp_i/dt = \eta_i \cos(\varphi - \psi)$. Однако углы φ и ψ тензоров скоростей деформаций ползучести и самих деформаций равны только при стационарном напряженном состоянии и в условиях пропорционального нагружения. При этих и только этих режимах нагружения мера p_i эквивалентна мере p'_i .

В случае сложного нагружения $\varphi(t) \neq \psi(t)$, поэтому очевидно, что меры $p'_i = \int_0^t \eta_i dt$ и $p_i = \int_0^t \eta_i \cos(\varphi - \psi) dt$ неэквивалентны. Этот существенный недостаток устранен в энергетическом варианте теории ползучести, так как при выбранных в нем мерах процесса ползучести и его интенсивности при любом пути нагружения всегда $dA/dt = W$.

Из анализа экспериментальных данных по их длительной прочности следует, что в выражении (6) критерий длительной прочности σ_i нужно заменить критерием

$$\sigma_{e*} = \sqrt{S_2} f(\zeta) + \beta \sigma_0, \quad \beta \geq 0 \quad (11)$$

($\sqrt{S_2} = \sigma_i/\sqrt{3}$ — второй инвариант девиатора тензора напряжений). В случае $\beta = 0$ эквивалентное напряжение (11) совпадает с эквивалентным напряжением (10).

В работе [6] изложена методика определения материальных констант α , λ , ν , β и обоснована достоверность выбора функции $f(\zeta)$.

Не нарушая общности, уравнение состояния (7) и кинетическое уравнение для параметра поврежденности (8) окончательно можно записать в виде

$$\frac{dA}{dt} = \frac{\Phi_1(\sigma_e, \theta)}{U_1(A)U_2(\omega)}, \quad \frac{d\omega}{dt} = \frac{\Phi_2(\sigma_{e*}, \theta)}{U_3(A)U_4(\omega)}. \quad (12)$$

Систему уравнений (1), (9)–(12), как и выше, будем называть энергетическим вариантом теории ползучести и длительной прочности, в котором процессы ползучести и накопления повреждений являются сопутствующими и оказывающими взаимное влияние процессами.

Из решения системы уравнений (12) следует, что $\omega = \omega(A)$. Только в случае, когда удельную работу рассеяния можно отождествить с параметром поврежденности ω , система уравнений (1), (9)–(12) представляет собой энергетический вариант кинетической теории, в котором процессы ползучести и накопления повреждений — единый процесс; в этом случае уравнения (12) эквивалентны.

В случае равенства функций U_1, U_2, U_3 константам система уравнений (1), (9)–(12) вырождается в систему, соответствующую теории Л. М. Качанова, согласно которой процессы ползучести и накопления повреждений являются двумя независимыми процессами.

Отметим, что энергетический вариант теории ползучести и длительной прочности еще далек от завершения. Например, представление эквивалентного напряжения в виде (10) не является единственно возможным. Для материалов, процесс ползучести которых зависит от вида напряженного состояния, различные варианты аппроксимации функции $f(\zeta)$ представлены в работах [8–11].

Большинство конструкционных сплавов представляют собой существенно анизотропную среду, поэтому обобщение зависимостей (1), (9)–(12) на такие материалы с одновременной разработкой методики определения материальных функций и констант представляет собой самостоятельную задачу.

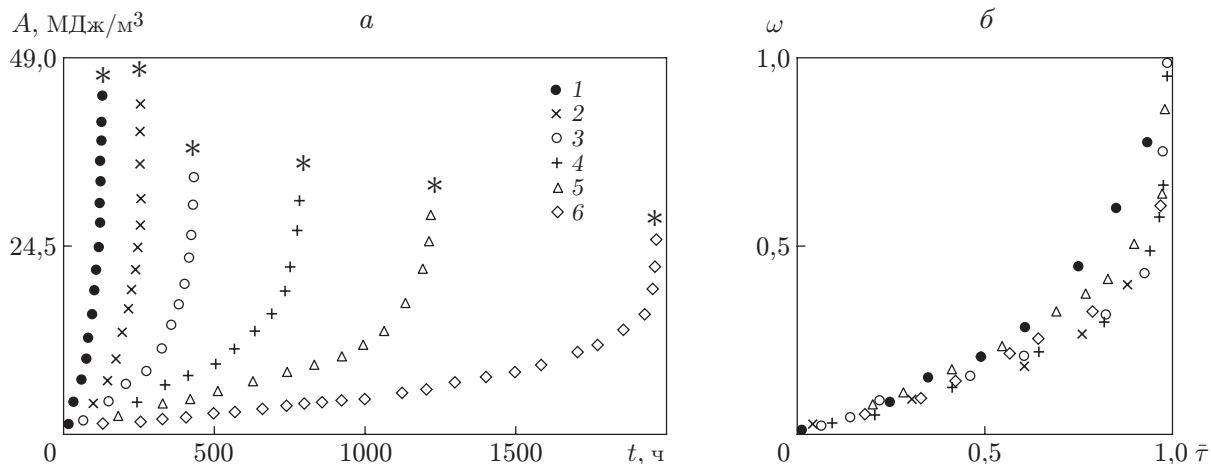


Рис. 3. Кривые удельной работы рассеяния в процессе ползучести (а) и “единая кривая” в координатах $\omega - \bar{\tau}$ (б) для сплава ОТ-4 при $\theta = 500$ °С и различных значениях напряжения при растяжении: 1 — $\sigma = 132$ МПа; 2 — $\sigma = 113$ МПа; 3 — $\sigma = 98$ МПа; 4 — $\sigma = 93$ МПа; 5 — $\sigma = 88$ МПа; 6 — $\sigma = 78$ МПа; звездочки — момент разрушения t_* и значение работы A_* в момент разрушения образца

Рассмотрим еще один экспериментальный результат. Для ряда современных материалов в широком температурно-временном интервале (при температурах старения, в области структурно-фазовых изменений) удельная работа в момент разрушения может существенно зависеть от температуры, уровня и вида напряженного состояния, т. е. $A_* = A_*(\theta, \sigma_i, \zeta)$. Однако кривые удельной диссипирующей работы, построенные в переменных $\omega - \bar{\tau}$ ($\omega = A/A_*$; $\bar{\tau} = t/t_*$), представляют собой единую кривую. На рис. 3 показаны кривые удельной работы рассеяния в случае растяжения для титанового сплава ОТ-4 при температуре 500 °С.

Использование энергетического варианта теории ползучести: результаты и перспективы. Добавляя к уравнениям (1), (9)–(12) уравнения равновесия, соотношения Коши, уравнения неразрывности скоростей деформаций ползучести и соответствующие граничные условия, получаем замкнутую систему, позволяющую определять напряженно-деформированное состояние тела в любой момент времени вплоть до момента начала его разрушения. Иными словами, энергетический вариант кинетической теории ползучести, как и любой другой ее вариант, объединил две задачи, а именно задачу расчета напряженно-деформированного состояния тела и задачу вычисления времени начала его разрушения, в одну задачу, которую можно решить любым известным методом.

В работе [12] энергетический вариант теории ползучести используется для построения модели материала, описывающей высокотемпературную ползучесть, и решения связанной задачи термомеханического и теплофизического поведения твэлов (элементов конструкций ядерных реакторов) в аварийных ситуациях.

Отметим, что энергетический вариант теории ползучести и длительной прочности использовался также при обосновании возможности горячего формообразования элементов конструкций из алюминиевых сплавов. В частности, результаты этого обоснования легли в основу разработанной системы автоматизированного проектирования, моделирования и электронной отработки процессов изготовления монолитных панелей двойной кривизны и сложной гравюры современных авиационных изделий [13–15].

Кроме того, использование данного энергетического варианта теории ползучести позволило разработать технологию, сочетающую горячее формообразование (штамповку), нагрев под закалку и собственно операцию термоупрочнения (закалку), и тем самым обеспечить изготовление основных формообразующих деталей башни боевой машины пехоты (БМП-3) [16].

В заключение отметим, что энергетический вариант теории ползучести и длительной прочности позволяет рассчитать напряженно-деформированное состояние элементов конструкций и одновременно оценить с феноменологических позиций не только израсходованный ресурс материала, но и остаточный, значение которого закладывается в расчет дополнительного времени службы элементов конструкций, отработавших нормативный срок эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Горев Б. В., Соснин О. В.** Технологические процессы обработки металлов давлением в режимах ползучести и их моделирование // Современные металлические материалы и технологии (СММТ-2009): Тр. Междунар. науч.-техн. конф. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. С. 257–268.
2. **Работнов Ю. Н.** Ползучесть элементов конструкций. М.: Наука, 1966.
3. **Писаренко Г. С.** Уравнения и краевые задачи теории пластичности и ползучести: Справ. пособие / Г. С. Писаренко, Н. С. Можаровский. Киев: Наук. думка, 1981.
4. **Закономерности** ползучести и длительной прочности: Справ. / Под общ. ред. С. А. Шестерикова. М.: Машиностроение, 1983.
5. **Соснин О. В.** Энергетический вариант теории ползучести / О. В. Соснин, Б. В. Горев, А. Ф. Никитенко. Новосибирск: Ин-т гидродинамики, 1986.
6. **Никитенко А. Ф.** Ползучесть и длительная прочность металлических материалов. Новосибирск: Новосиб. гос. архит.-строит. ун-т, 1997.
7. **Никитенко А. Ф., Соснин О. В.** О разрушении при ползучести // ПМТФ. 1967. № 3. С. 74–75.
8. **Соснин О. В.** О ползучести материалов с разными характеристиками на растяжение и сжатие // ПМТФ. 1970. № 5. С. 136–139.
9. **Горев Б. В., Никитенко А. Ф.** К ползучести материалов с разными характеристиками на растяжение и сжатие // Динамика сплошной среды / АН СССР. Сиб. отд-ние. Ин-т гидродинамики. 1970. Вып. 6. С. 105–110.
10. **Горев Б. В., Рубанов В. В., Соснин О. В.** О построении уравнений ползучести для материалов с разными свойствами на растяжение и сжатие // ПМТФ. 1979. № 4. С. 121–128.
11. **Горев Б. В., Любашевская И. В., Соснин О. В.** К вопросу о ползучести материалов с разными свойствами на растяжение и сжатие // Тр. 4-й Всерос. науч. конф. с междунар. участием “Математическое моделирование и краевые задачи”. Самара: Сам. гос. техн. ун-т, 2007. Ч. 1. С. 77–81.
12. **Шарый Н. В.** Прочность основного оборудования и трубопроводов реакторных установок ВВЭР / Н. В. Шарый, В. П. Семишкин, В. А. Пиминов, Ю. Г. Драгунов. М.: ИздАТ, 2004.
13. **Банщикова И. А., Горев Б. В., Олейников А. И., Пекарш А. И.** К расчету процесса деформирования листовых деталей двойной кривизны из сплавов с разными свойствами на растяжение и сжатие в условиях ползучести // Материалы 12-го Междунар. симп. “Динамические и технические проблемы механики конструкций и сплошных сред”. М.: Моск. авиац. ин-т, 2006. С. 41–43.

14. **Горев Б. В., Соснин О. В., Загарин Ю. В.** Технология процесса формообразования деталей двойной знакопеременной кривизны в режиме ползучести и устройство для его осуществления // Военная техника, вооружение и технологии двойного применения: Материалы 3-го Междунар. технолог. конгр. Омск: Омский гос. ун-т, 2005. Ч. 1. С. 117–119.
15. **Олейников А. И.** Интегрированное проектирование процессов изготовления монолитных панелей / А. И. Олейников, А. И. Пекарш. М.: Эконом, 2009.
16. **Арцруни А. А., Никитенко А. Ф.** Технологические особенности формообразования алюминиевой противоснарядной брони марки АБТ 102 // Актуальные проблемы защиты и безопасности: Тр. 8-й Всерос. науч.-практ. конф. “Технические средства противодействия терроризму”. СПб.: Науч.-произв. об-ние спец. материалов, 2005. Т. 1. С. 173–180.

Поступила в редакцию 1/III 2010 г.
