

УДК 539.3

А.Ю. Ларичкин, Б.В. Горев

ПОСТРОЕНИЕ СДВИГОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ПОЛЗУЧЕСТИ ИЗ ЧИСТОГО КРУЧЕНИЯ СПЛОШНЫХ КРУГЛЫХ ВАЛОВ

A.Yu. Larichkin, B.V. Gorev

Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS,
15 Acad. Lavrentyev Ave., Novosibirsk, 630090, Russia

THE CONSTRUCTING SHEAR STRAINS FROM THE PURE TORSION OF ROUND SOLID SAMPLES

На примере титанового сплава VT-9 и алюминиевых сплавов D16T, AK4-1T, AMG-6M показана возможность описания процесса ползучести и их разрушения применительно к задаче кручения круглых валов. При обработке экспериментальных данных использовался степенной закон ползучести. В экспериментах на чистое кручение величина касательных напряжений не превосходила предела упругости материала. Получено вполне удовлетворительное совпадение расчетов с экспериментальными данными.

ПОЛЗУЧЕСТЬ, ДЕФОРМАЦИЯ СДВИГА, ЧИСТОЕ КРУЧЕНИЕ, СПЛОШНОЙ КРУГЛЫЙ ВАЛ, КИНЕТИЧЕСКОЕ УРАВНЕНИЕ.

Trough the example of titanium VT-9 and aluminium alloys (D16T, AK4-1T, AMG-6M) the possibility of describing the creep and fracture on torsion of solid round samples has been demonstrated. The power law of creep was used. The kinetic creep equation in the energy form describes three stages of creep. Satisfactory agreement between the experimental and settlement data was obtained.

CREEP, SHEAR STRAIN, PURE TORSION, ROUND SOLID SHAFT, KINETIC EQUATION.

Сдвиговые характеристики материалов, которые являются доминирующими при расчетах процессов формообразования детали, определяются из экспериментов на кручение тонкостенных цилиндрических образцов, однако при конечных деформациях свыше 8–10 % тонкостенные образцы теряют устойчивость. В связи с этим для больших деформаций следует использовать толстостенные или сплошные образцы [1].

Для получения одноосных кривых ползучести τ – γ из экспериментов по кручению сплошных круглых цилиндров, где касательное напряжение $\tau = \sigma_i / \sqrt{3}$, сдвиговая деформация $\gamma = \sqrt{3}\varepsilon_i$ (σ_i – интенсивность напряжений, ε_i – интенсивность деформаций ползучести), использовался приближенный метод характеристического напряжения. В нагруженном круглом сплошном образце предполагается существование не-

которой характеристической точки (ХТ). В ее малой окрестности реализуется практически неизменное во времени напряженное состояние вплоть до начала разрушения [2]. Величины деформаций и напряжений в этой ХТ определяют поведение всей конструкции в целом, вплоть до разрушения.

Понятие характеристической точки условно, так как непосредственные расчеты на ползучесть с использованием уравнений повреждаемости показывают, что интенсивность напряжений в этой точке остается постоянной в некоторых пределах [2]. Интенсивность напряжения зависит, хотя и слабо, от показателей ползучести, повреждаемости и разупрочнения. Далее в работе все значения интересующих нас величин определяются в ХТ.

В работе [1] приведено сравнение экспериментальных данных по кручению тон-

костенных и толстостенных образцов при одинаковых касательных напряжениях τ в ХТ. Определялись значения сдвиговой деформации в тонкостенном образце и в ХТ толстостенного образца γ при развитых деформациях. Анализ показал практическое совпадение кривых $\tau - \gamma$ для толстостенных и тонкостенных образцов при малых и развитых деформациях.

Координата ХТ для сплошного круглого образца вычисляется по формуле

$$r = R \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^{n/(n-1)},$$

а если неизвестен показатель ползучести n , то координату ХТ с достаточной степенью точности можно определять как пересечение эпюр упругого и идеально пластического распределения напряжений $r = 3R/4$ [2].

Значение напряжения в ХТ вычислялось по формулам:

$$\tau = \frac{M}{I_{np}} r^{\frac{1}{n}} = \frac{M}{W_{1p}} \frac{r}{R}$$

(при известном показателе ползучести n) и

$$\tau = \frac{M}{W_p}$$

(если параметр n неизвестен), где

$I_{np} = \int_0^R r^{2+\frac{1}{n}} dr$ — полярный момент сечения;

$W_{1p} = \frac{\pi R^3}{2}$, $W_p = \frac{2}{3} \pi R^3$ — соответственно упругий и пластический моменты сопротивления кручению.

Численный анализ перераспределения напряжений проводился с помощью одноосных зависимостей, в предположении гипотез плоских сечений и прямых радиусов. Величина интенсивности деформаций в ХТ при кручении вычислялась по формуле Одквиста:

$$\varepsilon_i = \frac{1}{\sqrt{3}} \int_0^t \frac{r \dot{\phi}}{l_0} dt = \gamma / \sqrt{3}. \quad (1)$$

Сведение в «единую кривую» экспериментальных диаграмм ползучести для кручения сплошных круглых образцов, построенных в ХТ, с использованием в качестве параметра поврежденности $\omega = A / A^*$ ($A^* \neq \text{const}$) — нормированной удельной работы рассеяния и нормированного времени

$\bar{\tau} = t / t^*$ [3, 4], выражается равенством

$$(1 - \omega^{(1+\alpha)})^{m+1} = 1 - \bar{\tau} \quad (0 \leq \omega \leq 1) \quad (2)$$

и позволяет при

$$\tau = \text{const}, \quad A^* = A^*(\tau) = \int_0^{t^*} \tau \dot{\gamma} dt \neq \text{const}$$

описать деформирование материалов с тремя стадиями ползучести уравнениями в энергетической форме [5]. Последние имеют вид

$$\frac{dA}{dt} = \frac{B_A \tau^n}{\omega^\alpha (1 - \omega^{\alpha+1})^m}; \quad \frac{d\omega}{dt} = \frac{B_\omega \tau^k}{\omega^\alpha (1 - \omega^{\alpha+1})^m}, \quad (3)$$

где $\dot{\gamma}$ — скорость сдвиговой деформации ползучести в ХТ; $\bar{\tau}$ — нормированное время; t^* — значение времени в момент разрушения образца; A, A^* — удельная работа рассеяния при ползучести в текущий момент и в момент разрушения в ХТ, соответственно; ω — скалярный параметр поврежденности материала; α, m — параметры упрочнения и разупрочнения.

В системе из двух определяющих уравнений ползучести и повреждаемости в каждом используется одна и та же функция от повреждаемости, поэтому система (3) содержит на один параметр меньше, чем уравнения Работнова, и она не обладает произволом [6].

Разупрочняющийся материал. В этом случае $\alpha = 0, m \neq 0$; уравнение единой кривой (2) примет следующий вид:

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

Для определения m используются экспериментальные данные во всем диапазоне изменения параметра поврежденности ω . Если проинтегрировать уравнение повреждаемости при фиксированных значениях τ, τ_0 и температуры от некоторых текущих значений ω, ω_0 до разрушения $\omega = \tau = 1$, то получим соотношение

$$(1 - \omega)^{m+1} = (m+1) B_\omega \tau^k t^* (1 - \bar{\tau}),$$

которое в двойных логарифмических координатах

$$\ln(1 - \bar{\tau}) - \ln(1 - \omega)$$

представляет собой уравнение прямой. По ее наклону находится коэффициент m , который определяется как среднее значение

ние m_j для нескольких значений τ_j . Коэффициент k находится из наклона прямой $\ln(t_j^*) - \ln(\tau_j)$. Коэффициенты B_ω , B_A и показатель ползучести n определяются общепринятыми методами из экспериментальных данных мощности рассеяния энергии и скорости накопления повреждений в начальный момент времени $W = W_0$, $\omega = \omega_0$ либо на установившемся участке кривой ползучести, если он есть [5]. Также для каждого $\tau_j = \text{const}$ в j -м эксперименте находим:

$$\omega = 1 - [1 - (m + 1)B_\omega \tau_j^k]^{1/(m+1)};$$

$$A = \frac{B_A}{B_\omega} \tau_j^{n-k} \omega; \quad \omega = A / A_j^*; \quad A_j^* = \frac{B_A}{B_\omega} \tau_j^{n-k};$$

$$\bar{\tau} = t / t_j^*; \quad t_j^* = \frac{1}{(m + 1)B_\omega \tau_j^k}.$$

В случае, когда неизвестны A^* , t^* для каждого $\tau_j = \text{const}$, можно, тем не менее, определить среднее значение времени разрушения $t^*(\tau_j)$ из опытных кривых (с точностью до разброса экспериментальных данных) и, следовательно, рассчитать $\bar{\tau} = t / t_j^*$. Преобразуя первое уравнение (3), получим выражение

$$W = B_A \tau_j^n / (1 - \bar{\tau})^{m/(m+1)},$$

которое в двойных логарифмических координатах

$$\ln(1 - \bar{\tau}) - \ln(W)$$

представляет собой уравнение прямой с тангенсом угла наклона $m/(m+1)$. Таким образом находим m_j для каждого $\tau_j = \text{const}$. Среднее значение m_j даст искомое m .

Приведем параметры функциональных зависимостей кинетических уравнений (3), экспериментальные и расчетные кривые, полученные при кручении круглых сплошных образцов для материалов АК4-Т1, Д16Т при $T = 250^\circ\text{C}$.

На рис. 1 приведены экспериментальные значения интенсивностей деформаций ползучести и работы рассеяния в ХТ для кручения сплошных круглых валов из сплава АК4-1Т при $T = 250^\circ\text{C}$ и их аппроксимация по кинетическим уравнениям ползучести со скалярным параметром поврежденности. Также на рис. 1, в приведена «единая кри-

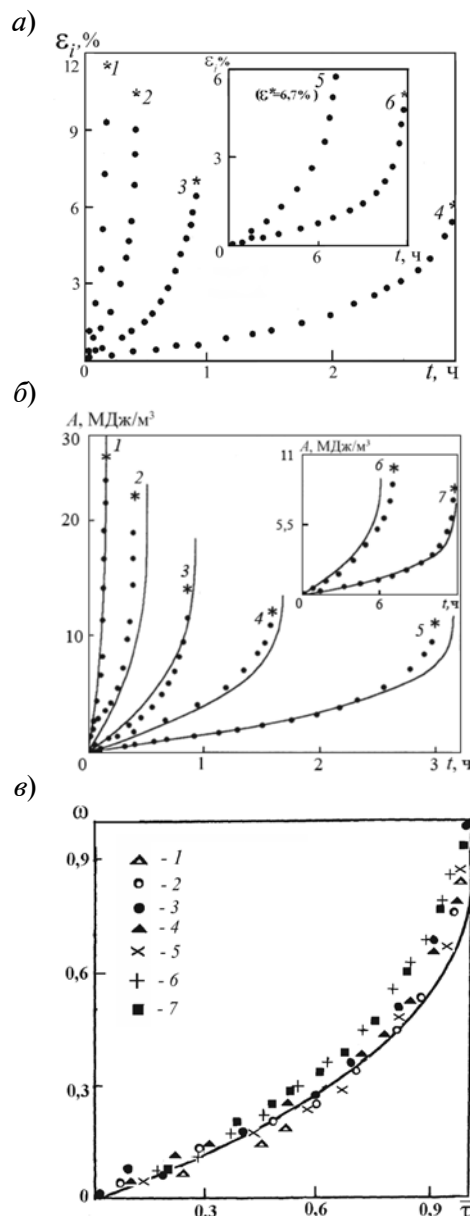


Рис. 1. Этапы построения сдвиговых деформаций из чистого кручения сплошных круглых образцов (сплав АК4-1Т при $T = 250^\circ\text{C}$): точки – экспериментальные значения диаграмм интенсивности деформаций ползучести (а), работы рассеяния (б) в ХТ и их представление в виде единой кривой в нормированных координатах (в) при различных значениях постоянной интенсивности напряжений σ_i (1 – 7); звездочками обозначены моменты разрушения образцов; аппроксимация экспериментальных данных (сплошные линии) кинетическими уравнениями (3) (см. б) со скалярным параметром поврежденности ω (параметры аппроксимации представлены в таблице). Значения σ_i , МПа: 230 (1), 210 (2), 200 (3), 190 (4), 180 (5), 170 (6), 160 (7)

Параметры аппроксимации экспериментальных зависимостей уравнениями «единой кривой» для круглых сплошных образцов

Марка сплава	Размеры образца, мм	$T, ^\circ\text{C}$	Параметр	Значение
АК4-1Т	$R = 10$ $l_0 = 50$	250	$B_A, \text{МПа}^{-n} \cdot \text{с}^{-1}$	$1,83 \cdot 10^{-36}$
			n	16
			m	2
			$B_0, \text{МПа}^{-k} \cdot \text{с}^{-1}$	$1,88 \cdot 10^{-28}$
Д16Т	Трубчатый, $r_{\text{внутр}} = 18$ $R_{\text{внеш}} = 20$ $l_0 = 36$	250	$A^*, \text{МДж/м}^3$	8,8
			$B, \text{МПа}^{-n} \cdot \text{с}^{-1}$	$2,15 \cdot 10^{-14}$
			n	6
			m	10
АМГ-6М	$R = 10$ $l_0 = 42$	450	$B, \text{МПа}^{-n} \cdot \text{с}^{-1}$	$3,48 \cdot 10^{-7}$
			n	4,61
ВТ-9	$R = 5$ $l_0 = 40$	900	$B, \text{МПа}^{-n} \cdot \text{с}^{-1}$	$1,21 \cdot 10^{-6}$
			n	3,46

вая» в нормированных координатах (различные символы – экспериментальные данные, представленные на рис. 1, а, б) и сплошной линией показана их аналитическая аппроксимация (рис. 1, в) [3]. Образцы были вырезаны в направлении проката плиты $h = 64$ мм в состоянии поставки. Все найденные значения параметров аппроксимации представлены в таблице.

На рис. 2 приведены экспериментальные значения работы рассеяния во всем объеме образца и их аппроксимация для ряда постоянных в ХТ касательных напряжений значения. Эксперименты проводились на круглых трубчатых образцах из материала Д16Т при температуре 250°C . Образцы вырезались из прутка диаметром 40 мм в продольном направлении. Д16Т является анизотропным

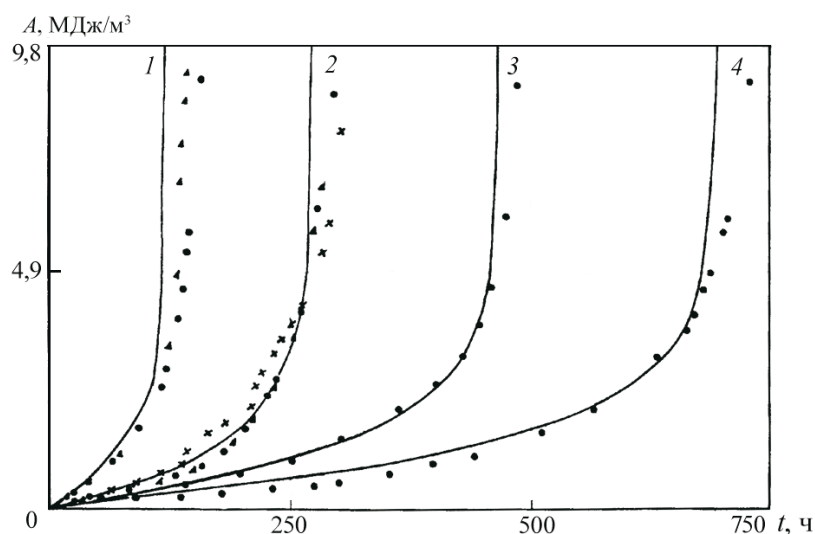


Рис. 2. Значения рассеянной работы во всем объеме образца (символы) в экспериментах по чистому кручению круглых трубок из сплава Д16Т при $T = 250^\circ\text{C}$ для различных значений постоянного касательного напряжения в ХТ τ (1 – 4), и аппроксимация экспериментальных данных (сплошные линии). Параметры аппроксимации приведены в таблице. Значения τ , МПа: 45 (1), 40 (2), 36 (3), 34 (4)

материалом с одинаковыми свойствами на растяжения и сжатие. При его кручении процесс ползучести происходит в два раза интенсивнее, по сравнению с ползучестью при растяжении и сжатии для одной и той же величины интенсивности напряжений. Тем не менее, для этого сплава критическое значение удельной работы рассеяния энергии при ползучести остается одинаковым и составляет $A^* = 8,8$ МДж/м³.

Материал с тремя стадиями ползучести. В этом случае $\alpha \neq 0$, $m \neq 0$; уравнение единой кривой примет вид (2). Параметр упрочнения α определяется по данным из начального участка единой кривой (до точки перехода на установившуюся стадию ползучести). Принимаем условие

$$d\omega / dt = B_\omega \tau^n / \omega^\alpha$$

и интегрируем это равенство от нулевого состояния до текущего ω , t , а затем логарифмируем; в итоге получаем уравнение прямой линии:

$$(\alpha + 1) \ln \omega = \ln[(\alpha + 1)B_\omega \tau^n] + \ln t.$$

По наклону полученных зависимостей для нескольких значений τ_j (либо сразу по усредненным значениям единой кривой с использованием метода наименьших квадратов) находится коэффициент α .

Показатель разупрочнения материала m находится по конечному участку экспериментальной единой кривой (после точки перегиба) для материалов с упрочнением. Метод отыскания показателя m аналогичен методу, использованному для разупрочняющегося материала:

$$t^* = \frac{1}{(m + 1)(1 + \alpha)B_\omega \tau^k}.$$

Данные экспериментов материалов с тремя стадиями ползучести и значения констант аппроксимационных зависимостей приведены в работе [4].

Материал с установившейся стадией ползучести. В этом случае $\alpha = 0$, $m = 0$; уравнение единой кривой (2) примет вид $\omega = \tau$, первое уравнение (3) преобразуется в уравнение вида

$$dA/dt = B\tau^n. \quad (4)$$

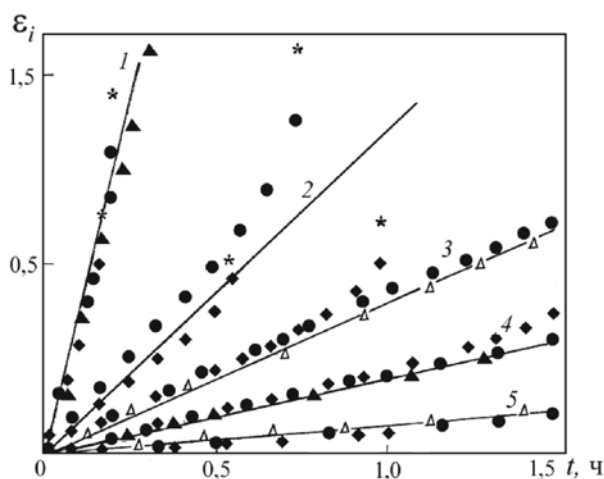


Рис. 3. Экспериментальные диаграммы деформирования при чистом растяжении (кружки и ромбики) и чистое кручение сплошных (темные треугольники) и толстостенных трубчатых (светлые треугольники) образцов из сплава АМГ-6М при $T = 450$ °С.

Диаграммы получены для образцов, вырезанных под углами 0° (кружки, темные и светлые треугольники) и 45° (ромбики) к оси прутка при различных интенсивностях напряжений σ_i , МПа: 19,60 (семейство символов и прямая 1), 14,70 (2), 12,25 (3), 9,82 (4), 7,50 (5). Звездочки – моменты разрушения образцов. Прямые линии – аппроксимация данных степенной зависимостью (4) (параметры см. в таблице)

Приведем характеристики, экспериментальные и расчетные кривые, полученные при деформировании образцов из материалов АМГ-6М при температуре $T = 450$ °С.

На рис. 3 представлены результаты экспериментов на чистое кручение и растяжение для сплава АМГ-6М при температуре $T = 450$ °С (температура сверхпластического течения) и аппроксимация экспериментальных данных по степенной зависимости (4). Образцы для экспериментов вырезались из прутка, имеющего диаметр 45 мм в состоянии поставки, вдоль его оси и под 45° к ней. Эксперименты на чистое кручение образцов проводились с той же величиной интенсивности напряжений в характеристической точке (ХТ), что и при растяжении. Звездочками показано разрушение – распад образца на две части [3]. Отметим, что для материала АМГ-6М образцы на кручение разрушались при большем значении интенсивности деформаций, чем при растяжении.

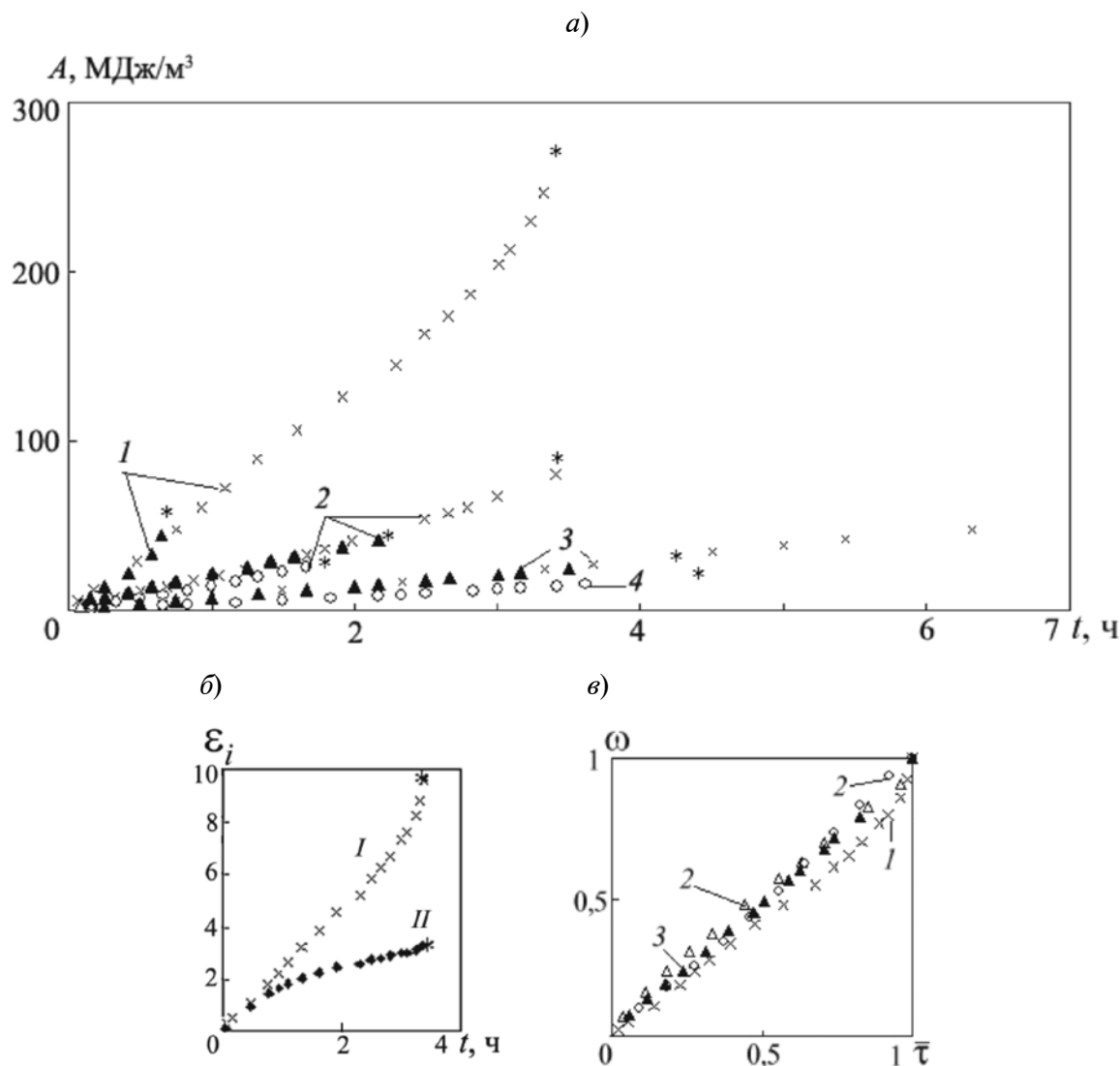


Рис. 4 Результаты испытаний на ползучесть сплава ВТ-9 ($T = 900 \text{ }^\circ\text{C}$) при больших деформациях: чистое растяжение круглых образцов, вырезанных под углом 0° (кружки) и 45° (треугольники) к оси прутка диаметром 50 мм; чистое кручение (крестики): а – значения работы рассеяния в ХТ; б – интенсивности деформаций, вычисленные по формулам Одквиста (1) (семейство символов I) и Надаи (5) (семейство символов II) для $\sigma_i = 28 \text{ МПа}$; в – представление данных в нормированных координатах.

Эксперименты проведены при различных интенсивностях постоянных напряжений σ_i , МПа: 28 (1), 20 (2), 15 (3), 14 (4) (параметры см. в таблице)

На рис. 4 приведены результаты экспериментов на ползучесть титанового сплава ВТ-9 при $T = 900 \text{ }^\circ\text{C}$ для чистого растяжения и чистого кручения, с различными значениями постоянных интенсивностей напряжений. Образцы для испытаний на кручение вырезались из прутка диаметром 50 мм вдоль его оси.

Следует отметить, что величины ϵ_i в момент разрушения образцов при кручении превосходят таковые на растяжение в разы при одной и той же величине $\sigma_i = \text{const}$. Объяснить это можно, по-видимому, существенной разнсопротивляемостью материала растяжению и сжатию в условиях ползучести. Вместе с тем в нормированных

координатах все экспериментальные точки группируются в единую кривую.

Из представленных на рис. 4 кривых следует, что сплав ВТ-9 при температуре сверхпластичности 900 °С подчиняется закону установившегося течения практически вплоть до разрушения без каких-либо проявлений упрочнения-разупрочнения. Удовлетворительное совпадение экспериментальных значений удельной работы рассеяния при растяжении образцов, вырезанных в направлениях под 0° и 45° к оси прутка, и при кручении для одной и той же величины $\sigma_i = \text{const}$ позволяет утверждать, что исследуемый материал изотропен. Отметим, что величина деформации при кручении достигает в момент разрушения очень больших значений (порядка $\varepsilon_i \approx 10$). Так, для одной и той же интенсивности напряжений $\sigma_i = 28$ МПа указанная величина при кручении превышает деформацию при растяжении почти в пять раз.

Использование формулы Надаи [7] для обработки экспериментов на чистое кручение дает отклонение от единой кривой уже при деформациях, превышающих $\varepsilon_i \approx 1$. Действительно, экспериментальные данные для $\sigma_i = 28$ МПа, обработанные по формуле из [7]:

$$\varepsilon_i^{(\ln)} = \frac{\gamma^{(\ln)}}{\sqrt{3}}, \quad (5)$$

$$\gamma^{(\ln)} = \sqrt{\frac{2}{3}} \ln \left[1 + \left(\frac{r\varphi}{2} \right)^2 + r\varphi \left(1 + \frac{(r\varphi)^2}{4} \right)^{1/2} \right],$$

где φ — угол закручивания, l_0 — рабочая длина образца, r — радиус ХТ при деформациях, превышающих единицу (см. рис. 4, б), «заваливаются» к оси абсцисс, существенно отклоняясь от прямой линии; уже при значении $t = 2$ разница составляет более 50 %. Таким образом, при обработке данных на кручение с использованием величины $\varepsilon_i^{(\ln)}$ по формуле Надаи (5) материал как бы упрочняется (в то же время при растяжении материал подчиняется закону установившейся ползучести), а это противоречит гипотезе «единой кривой».

Для использования формулы (1) необходимо принять гипотезы прямых радиусов и

плоских сечений, непротиворечивость которых проверялась экспериментально при проведении экспериментов на материале АМГ-6М ($T = 450$ °С) для $\sigma_i = 15; 20$ МПа. В сплошных круглых образцах диаметром 20 мм с рабочей длиной 42 мм просверливалось два отверстия диаметром 0,5 мм по радиусу до оси образца в середине и вблизи радиуса закругления рабочей части. В отверстия вставлялись медные проволоочки — «свидетели» и образцы закручивались до различных степеней деформаций. Последующий срез образца позволял визуально установить, что поперечные сечения образцов остаются плоскими, а радиусы прямолинейными.

Также гипотезы «прямых радиусов» и «плоских сечений» были проверены экспериментально на сплаве ВТ-9 и подтвердились при величине $\varepsilon_i \approx 3$.

В заключение важно отметить, что если следовать уравнениям единой кривой (2), то необходимо проверять подобие первичных кривых деформирования материала вплоть до разрушения в терминах «поврежденность — время». Процесс ползучести полностью определяется текущими значениями напряжений τ и величиной поврежденности ω , вне зависимости от того, как накоплена эта величина [5]. Следовательно, область применимости предлагаемых уравнений (3) ограничивается материалами, для которых выполняется условие существования единой кривой.

Таким образом, кинетические уравнения ползучести и повреждаемости в энергетической форме (3), с одинаковыми в обоих уравнениях функциями от параметра поврежденности (он равен нормированной удельной работе рассеяния энергии $\omega = A/A^*$), рекомендуется использовать для получения сдвиговых диаграмм материала при конечных деформациях. Значения интенсивности деформации при обработке экспериментальных данных на кручение сплошных круглых образцов в условиях ползучести, с достаточной для практического применения точностью, рекомендуется рассчитывать по формуле Одквиста.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект № 11-08-008445-а) и Проекта № 2.13.6 Программы РАН, программы фундаментальных иссле-

дований СО РАН № III.20.3. и ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России», государственный контракт 14.740.11.0355.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Горев, Б.В.** К описанию кривых деформирования при кручении [Текст]/ Б.В. Горев // Заводская лаборатория. – 1978. – № 4. – С. 1511–1514.
2. **Горев, Б.В.** К оценке ползучести и длительной прочности элементов конструкций по методу характеристических параметров. Сообщение 1 [Текст]/ Б.В. Горев // Проблемы прочности. – 1979. – № 4. – С. 30–36.
3. **Горев, Б.В.** К описанию ниспадающего участка кривой деформирования «напряжение – деформация» по кинетическим уравнениям со скалярным параметром поврежденности [Текст]/ Б.В. Горев, И.А. Банщикова // Вестник Самарского гос. техн. ун-та. Сер. Физико-математические науки. – 2008. – № 2 (17). – С. 110–117.
4. **Горев, Б.В.** К описанию процесса ползу-

чести и разрушения упрочняющихся материалов по кинетическим уравнениям со скалярным параметром поврежденности [Текст]/ Б.В. Горев, И.А. Банщикова // Вестник Самарского гос. техн. ун-та. Сер. Физико-математические науки. – 2009 – № 2 (19). – С. 90–98.

5. **Горев, Б.В.** К описанию процесса ползучести и длительной прочности по уравнениям с одним скалярным параметром повреждаемости [Текст]/ Б.В. Горев, И.Д. Клопотов // Прикладная механика и теоретическая физика. – 1994. – Т. 35. – № 5 (207). – С. 92–102.

6. **Работнов, Ю.Н.** Ползучесть элементов конструкций [Текст] / Ю.Н. Работнов. – М.: Наука, 1966. – 752 с.

7. **Надаи, А.** Пластичность и разрушение твердых тел [Текст]: В 2 тт. Т. 2. / А. Надаи. – М.: Мир, 1969. – 853 с.

REFERENCES

1. **Gorev B.V.** K opisaniju krivyh deformirovaniya pri kruchenii. *Zavodskaja laboratorija*, 1978, № 4, pp. 1511–1514. (rus)
 2. **Gorev B.V.** K ocenke polzuchesti i dlitel'noj prochnosti jelementov konstrukcij po metodu harakteristicheskix parametrov. *Message 1. Problemy prochnosti*, 1979, № 4, pp. 30–36. (rus)
 3. **Gorev B.V., Bانشhikova I.A.** K opisaniju nispadajushhego uchastka krivoj deformirovaniya «napryazhenie–deformacija» po kineticheskim uravnenijam so skaljarnym parametrov povrezhdennosti. *Vestnik Samarskogo gos. tehn. un-ta. Ser. Fiziko-matematicheskie nauki*, 2008, № 2 (17), pp. 110–117. (rus)
- Gorev B.V., Bانشhikova I.A.** K opisaniju pro-

cessa polzuchesti i razrushenija uprochnjajushhij-sja materialov po kineticheskim uravnenijam so skaljarnym parametrov povrezhdennosti. *Vestnik Samarskogo gos. tehn. un-ta. Ser. Fiziko-matematicheskie nauki*, 2009, № 2 (19), pp. 90–98. (rus)

5. **Gorev B.V., Klopotov I.D.** K opisaniju processa polzuchesti i dlitel'noj prochnosti po uravnenijam s odnim skaljarnym parametrov povrezhdadnosti. *Prikladnaja mehanika i teoreticheskaja fizika*, 1994, Vol. 35, № 5 (207), pp. 92–102. (rus)

6. **Rabotnov Yu.N.** Polzuchest' elementov konstrukcij. Moscow, Nauka, 1966, 752 p. (rus)

7. **Nadai A.** Plastichnost' i razrushenie tverdykh tel. Moscow, Mir, 1969, 853 p. (rus)

ЛАРИЧКИН Алексей Юрьевич – младший научный сотрудник лаборатории статической прочности Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН.

630090, г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 15
larichking@gmail.com

ГОРЕВ Борис Васильевич – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории статической прочности Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН.

630090, г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 15
gorevbv@yandex.ru