

## ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ПОЛЗУЧЕСТЬ И СВЕРХПЛАСТИЧНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ

УДК 539.374+376

О. В. Соснин, Б. В. Горев, И. В. Любашевская

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

С точки зрения механики процессы сверхпластичности (СП-течение) имеют много общего с процессами высокотемпературной ползучести. Некоторым из особенностей, характеризующих эти процессы, наряду с металлофизической интерпретацией можно дать простое объяснение с позиций механики деформируемого твердого тела.

Сверхпластичность характеризуется резким увеличением деформационной способности материала при значительном снижении его сопротивления в узком температурно-скоростном диапазоне нагружения. Это явление обычно связывают с тремя основополагающими факторами.

1. Достаточно высокая температура, при которой проходит процесс деформирования материала (от  $0,5 T_{пл}$  и выше,  $T_{пл}$  — температура плавления). При этом температурный интервал составляет обычно несколько десятков градусов, что легко объяснимо с позиций механики ползучести материалов. Действительно, диаграммы ползучести  $\epsilon^c = \epsilon^c(t)$  при умеренных фиксированных температурах и напряжениях имеют явно выраженные три стадии. С увеличением температуры на диаграммах исчезает первая стадия, а с дальнейшим ее ростом сокращается продолжительность третьей стадии, и в некотором интервале  $\Delta T$  весь процесс ползучести протекает по закону вязкого течения  $\epsilon^c = \varphi(\sigma, T)$  без первой и третьей стадии вплоть до разрушения материала. Экспериментально [1] и теоретически [2] установлено, что в таком режиме деформирования скорость накопления поврежденности в материале минимальная, и материал способен выдержать максимальную величину деформации к моменту разрушения, что служит одним из признаков сверхпластического деформирования. При дальнейшем увеличении температуры, как правило, вновь появляется третья стадия, и предельная деформация разрушения уменьшается. Температурный интервал  $\Delta T$ , в котором процесс деформирования протекает по закону вязкого течения, принято считать интервалом, отвечающим режимам типа СП-течения. В соответствии с подходами, принятыми в механике вязкой жидкости и сверхпластичности, уравнение, связывающее напряжение, температуру и скорость деформации, записывается в форме  $\sigma = \psi(\dot{\epsilon}, T)$ , а иногда с дополнительными параметрами, отражающими предысторию процесса. Чаще всего оно принимается в виде  $\sigma = B\dot{\epsilon}^m$ , где  $B = B(T)$ , показатель  $m$  (коэффициент скоростной чувствительности) зависит от скорости деформации ( $m = m(\dot{\epsilon})$ ). Приведенная форма зависимости весьма неудобна в приложениях. В механике твердого тела и, в частности, в механике ползучести указанную зависимость обычно записывают в форме, разрешенной относительно скорости деформаций  $\dot{\epsilon}^c = \varphi(\sigma, T)$  без каких-либо дополнительных параметров, отражающих предысторию процесса, т. е. в виде уравнения состояния. Как показано на ряде материалов, уравнение в такой форме хорошо согласуется с экспериментальными данными [3] и существенно удобнее в приложениях.

2. Малая скорость деформирования материала (порядка  $\dot{\epsilon} \approx 10^{-3} \text{ с}^{-1}$  и меньше). При таких скоростях и указанном выше ограничении по температуре «мгновенной» пластической деформации  $\epsilon^p$  не возникает. Действительно, как принято в технической литературе, будем считать, что общая деформация состоит из обратимой (упругой  $\epsilon^e$  и температурной

$\epsilon^T$  составляющих) и необратимой (пластической  $\epsilon^P$  и деформации ползучести  $\epsilon^c$ ):

$$\epsilon = \epsilon^e + \epsilon^T + \epsilon^P + \epsilon^c. \quad (1)$$

При фиксированной температуре и малом уровне напряжений, когда  $\sigma < \sigma_e$  ( $\sigma_e$  — предел упругости материала при заданной температуре) и  $\epsilon^P = 0$ , из (1), дифференцируя по времени, имеем  $\dot{\epsilon} = \dot{\sigma}/E + \dot{\epsilon}^c$ . Так как  $\dot{\epsilon}^c = \varphi(\sigma, T)$  и  $d\sigma/dt = (d\sigma/d\epsilon)V$  ( $V = \text{const}$  — скорость деформации,  $E$  — модуль упругости), получим

$$d\sigma/d\epsilon = E(1 - \varphi(\sigma, T)/V). \quad (2)$$

При нагружении с увеличением напряжения  $\sigma$  растет скорость деформации ползучести  $\dot{\epsilon}^c = \varphi(\sigma, T)$ , и при  $\dot{\epsilon}^c \rightarrow V$  дальнейшего увеличения напряжения не будет — диаграмма  $\sigma - \epsilon$  выйдет на горизонтальную асимптоту. Если ограничить скорость деформирования величиной  $V \leq \varphi(\sigma_e, T)$ , то напряжение  $\sigma$  в соответствии с (2) не выйдет за предел упругости, «мгновенной» пластической деформации не возникнет,  $\epsilon^P = 0$  в процессе всего деформирования. Поврежденность в материале при деформировании коррелирует с необратимой деформацией  $\epsilon_n = \epsilon^P + \epsilon^c$ . При этом многочисленными экспериментами на различных конструкционных сплавах показано, что составляющая  $\epsilon^P$  вносит поврежденность больше, чем  $\epsilon^c$  [4, 5]. Поэтому, чтобы иметь меньшую поврежденность материала и достичь максимальной остаточной деформации, надо материал деформировать в таком скоростном режиме, чтобы  $\epsilon^P \equiv 0$  и вся необратимая деформация накапливалась только за счет деформации ползучести.

3. Названные выше два условия являются необходимыми, но, очевидно, недостаточными для реализации режима СП-течения. Их выполнение обеспечивает режим высокотемпературной ползучести при низких уровнях напряжения без каких-либо особенностей деформационного поведения материала. Но, как принято считать, СП-течение есть следствие некоторых внутренних структурных изменений в материале на микроуровне, что отражается изменением всего комплекса физико-механических характеристик материала. При этом существенное значение имеет не сам факт изменения характеристик в рассматриваемом температурном интервале, а то, как они меняются: монотонно, без каких-либо особенностей или с резкими отклонениями от монотонности.

На рис. 1 приведены диаграммы температурного расширения  $\epsilon^T = f(T)$  двух конструкционных сплавов: титановый сплав ВТ-20 и сплав ВЛ-1Д на основе железа (линии 1 и 2). Монотонность первой и немонотонность второй диаграммы очевидны, и, как показали эксперименты [1], титановый сплав в указанном температурном диапазоне деформируется без каких-либо особенностей в режиме высокотемпературной ползучести, сплав же ВЛ-1Д в указанном диапазоне проявляет как эффект увеличения пластических свойств, так и их «провал».

Таким образом, в зависимости от особенностей изменения комплекса характеристик материала от температуры все сплавы можно разделить на две группы.

- Сплавы с монотонным изменением характеристик. Они деформируются в режиме высокотемпературной ползучести, для них эффекты типа СП-течения или их противоположности маловероятны. При соблюдении первых двух условий по температуре и скорости такие режимы деформирования можно назвать режимами, близкими к сверхпластичности.
- Сплавы с резко немонотонным изменением характеристик. Для них в области немонотонности с соблюдением первых двух условий можно обнаружить аномальность деформационно-прочностного поведения, т. е. эффекты типа СП-течения или их противоположность. По характеру диаграмм температурного расширения материала  $\epsilon^T = f(T)$  в [6] предложена простая методика определения температурной области, в которой возможны такие эффекты.

Деформационно-прочностное поведение материалов второй группы должно быть суще-

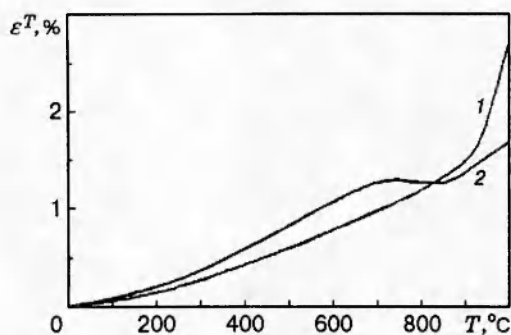


Рис. 1

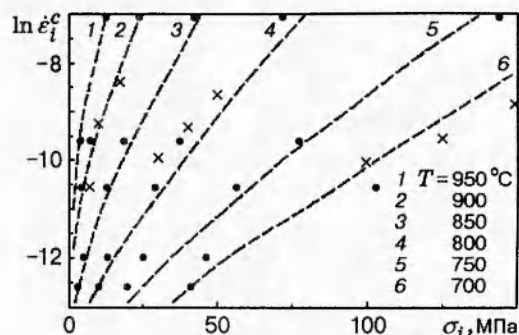


Рис. 2

ственно сложнее, но тензорно-линейная связь между скоростью деформации, напряжением и температурой, т. е. система определяющих уравнений, с точки зрения механики деформируемого твердого тела, по-видимому, будет аналогичной. С точки зрения отработки методики эксперимента нахождение параметров в определяющих уравнениях целесообразнее начать с исследования процессов высокотемпературного деформирования материала из первой группы.

Как уже отмечалось выше, к материалам первой группы можно отнести титановый сплав ВТ-20, на котором и проиллюстрированы возможности описания процессов высокотемпературного деформирования в широком температурно-силовом интервале в условиях меняющегося во времени сложного напряженного состояния. При выполнении этой работы преследовались две цели: предложить экспериментальную методику определения, к какой из двух групп относится сплав, с учетом особенностей изменения характеристик, непосредственно отражающих деформационно-прочностные свойства материала; разработать алгоритм нахождения параметров, входящих в определяющие уравнения, для всего рассматриваемого температурного диапазона и сравнить расчетные результаты с экспериментальными.

Пусть высокотемпературное деформирование материала описывается (с указанными выше первыми двумя ограничениями) зависимостью

$$\dot{\varepsilon}^c = \varphi(\sigma, T). \quad (3)$$

В (1) обратимая составляющая деформации  $\varepsilon_r = \varepsilon^e + \varepsilon^T$  обычно не превосходит 2 ÷ 3 % от общей деформации. Таким образом, общая деформация накапливается за счет необратимой составляющей, равной деформации ползучести

$$\varepsilon^c = \int_0^t \varphi(\sigma, T) dt.$$

При сложном напряженном состоянии, как было показано экспериментально на ряде материалов [3], зависимость (3) в предположении тензорно-линейной связи между напряжением и скоростью деформации примет вид

$$\dot{\varepsilon}_{kl}^c = \lambda \hat{\sigma}_{kl}^0, \quad \dot{\varepsilon}_i^c = \varphi(\sigma_i, T), \quad \varepsilon_i^p \equiv 0, \quad (4)$$

где  $\dot{\varepsilon}_i^c = ((2/3)\dot{\varepsilon}_{kl}^0\dot{\varepsilon}_{kl}^0)^{1/2}$ ;  $\sigma_i = ((3/2)\sigma_{kl}^0\sigma_{kl}^0)^{1/2}$ ;  $\hat{\sigma}_{kl}^0 = \sigma_{kl} - (1/3)\delta_{kl}\sigma_{nn}$ ;  $\dot{\varepsilon}_{kl}^0 = \dot{\varepsilon}_{kl}^c$ . Коэффициент пропорциональности  $\lambda$  в выражении (4) определяется обычным образом через операцию свертки:  $\lambda = 3\dot{\varepsilon}_i^c/(2\sigma_i)$ . В частном случае одноосного растяжения (сжатия)  $\sigma_i = \sigma$ ,  $\dot{\varepsilon}_i^c = \dot{\varepsilon}^c$  из (4) получаем (3).

Таким образом, предполагается, что зависимости (4) справедливы для обеих групп

материалов и разница только в аналитической аппроксимации выражения  $\dot{\epsilon}_i^c = \varphi(\sigma_i, T)$  вследствие того, что для материалов второй группы имеют место особенности немонотонного характера. В пространстве  $\dot{\epsilon}_i^c, \sigma_i, T$  последнее уравнение геометрически представляет поверхность температурно-скоростного режима деформирования с областью определения  $T \geq 0,5T_{пл}$  и  $\sigma \leq \sigma_e(T)$ . Вид и форма этой поверхности позволяют, с одной стороны, заключить, к какой группе принадлежит исследуемый материал, с другой — подсказать возможный вид аналитической аппроксимации этой зависимости.

Наиболее простой и распространенный в механике ползучести материалов метод определения функциональной зависимости в (4), а следовательно, и формы упомянутой поверхности режимов деформирования — это проведение экспериментов при фиксированных значениях напряжения и температуры с целью нахождения скоростей деформирования. На рис. 2 представлены результаты этих экспериментов в виде зависимости  $\dot{\epsilon}_i^c = \varphi(\sigma_i, T)$  для сплава ВТ-20 в диапазоне температур  $700^\circ\text{C} \leq T \leq 950^\circ\text{C}$ .

Эксперименты проводились при кручении тонкостенных трубчатых образцов с длиной рабочей части  $l = 36$  мм, внешним и внутренним диаметрами соответственно  $D = 20$  мм,  $d = 18$  мм или на сплошных цилиндрических образцах с той же рабочей длиной и внешним диаметром с использованием «метода характеристических параметров» [7]. Фиксированные значения напряжения и температуры поддерживались в пределах 0,5%. Результаты экспериментов при постоянных или ступенчато изменяющихся значениях  $\sigma_i$  и  $T$  отмечены крестиками на рис. 2. Эта методика при достаточном количестве экспериментального материала (7–10 экспериментов на каждую температуру) позволяет приближенно найти аппроксимирующую зависимость (4) и входящие в нее коэффициенты [3], но не может надежно предсказать, к какой группе следует отнести материал. Так, диаграммы, представленные на рис. 2, для материала ВТ-20 качественно такие же, как и для материала ВЛ-1Д [3], но материалы относятся к разным группам. Чтобы выяснить этот вопрос, необходимо получить более густую сеть дискретных значений скоростей деформаций при фиксированных  $\sigma_i$  и  $T$ , что весьма трудоемко, или же усовершенствовать методику эксперимента.

С этой точки зрения более информативными являются эксперименты с непрерывным изменением  $\sigma_i = \sigma_i(t)$  и  $T = T(t)$  по заданной программе. На рис. 3 результаты этих экспериментов представлены в виде диаграмм  $\sigma_i = \sigma_i(T)$ , показывающих зависимость  $\sigma_i$  от  $T$  (сплошные линии), при заданной постоянной величине  $\dot{\epsilon}_i^c$ . (Диаграмма пятого эксперимента при  $\dot{\epsilon}^c = 6,25 \cdot 10^{-6}$  1/с не изображена.) Обычно в эксперименте температура во времени изменялась по линейному закону, при этом скорость изменения температуры была различной, но на вид диаграмм  $\sigma_i = \sigma_i(T)$  влияла только фиксированная скорость деформации. Этого следовало ожидать, так как в зависимости  $\sigma_i = \sigma_i(T)$  время явно не входит, что существенно облегчает проведение эксперимента, не требуя строгой выдержки закона изменения  $T = T(t)$ . Эксперименты проводились при кручении сплошных цилиндрических образцов с заданной скоростью  $\dot{\epsilon}_i^c = \text{const}$ . Методика такого эксперимента изложена в [7].

Характер диаграмм (рис. 3) показывает монотонность изменения прочностных свойств материала в рассматриваемом температурном диапазоне и, как и данные  $\epsilon^T = f(T)$  (кривая 1 на рис. 1), говорит об отсутствии каких-либо аномалий в изменении физико-механических характеристик материала.

Было проведено несколько экспериментов на растяжение при «простом нагружении», когда значения  $\sigma_i$  и  $T$  изменялись пропорционально. При этом измерялись величины деформаций для определения  $\dot{\epsilon}_i^c$ . В данном случае диаграммы  $\dot{\epsilon}_i^c = \varphi(\sigma_i, T)$  ( $\sigma_i = \mu T$ ), отражающие деформационные свойства материала, имели также монотонный характер. Но здесь скорость деформаций приходилось определять через значения самих деформаций, что требовало более строгого соблюдения закономерностей изменения  $\sigma_i = \sigma_i(t)$  и  $T = T(t)$ .

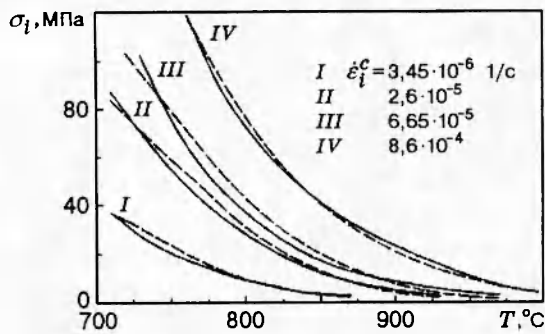


Рис. 3

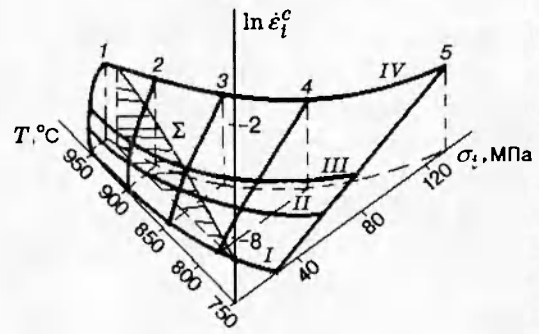


Рис. 4

Это технически более сложно, чем в предыдущих экспериментах.

Проводя вертикальные линии на рис. 3 для любого фиксированного значения  $T$ , можно получить в пересечениях с диаграммами дискретные значения  $\sigma_i$  и  $\dot{\epsilon}_i^c$  (кружки на рис. 2). Преимущества экспериментов с непрерывным изменением  $\sigma_i = \sigma_i(t)$  и  $T = T(t)$  по заданной программе перед экспериментами с фиксированными значениями  $\sigma_i$ ,  $T$  очевидны: они дают наглядную картину наличия или отсутствия аномалий в изменении деформационно-прочностных характеристик материала в рассматриваемом температурном интервале и позволяют найти входящие в (4) значения констант.

Аппроксимирующую зависимость выражения  $\dot{\epsilon}_i^c = \varphi(\sigma_i, T)$  будем искать в форме

$$\dot{\epsilon}_i^c = \exp(A(\bar{T}) + B(\bar{T})\sigma_i + C(\bar{T})/\bar{\sigma}_i), \quad (5)$$

где  $A(\bar{T}) = a_0 + a_1\bar{T} + a_2\bar{T}^2$ ;  $B(\bar{T}) = b_0 + b_1\bar{T} + b_2\bar{T}^2$ ;  $C(\bar{T}) = c_0 + c_1\bar{T} + c_2\bar{T}^2$ ;  $a_j, b_j, c_j$  — константы;  $\bar{\sigma}_i = \sigma_i \cdot 10^{-1}$  МПа;  $\bar{T} = T \cdot 10^{-2}$  °C.

Для определения всех констант материала, входящих в (5), составлена программа для ПЭВМ, которая по дискретным значениям рис. 2 или аналогичным значениям диаграмм рис. 3 позволяет вычислить следующие коэффициенты:

$$\begin{aligned} a_0 = 2,905, \quad a_1 = -5,489, \quad a_2 = 0,442, \quad b_0 = 17,793, \quad b_1 = -4,970, \\ b_2 = 0,355, \quad c_0 = -12,499, \quad c_1 = 2,550, \quad c_2 = -0,132. \end{aligned} \quad (6)$$

Легко видеть, что значение  $C(\bar{T})$  в рассматриваемом диапазоне температур при любых значениях  $T$  всегда отрицательно и при  $\sigma_i \rightarrow 0$  в соответствии с (5) скорость деформации  $\dot{\epsilon}_i^c \rightarrow 0$ .

На рис. 2 и 3 штриховыми линиями представлены аппроксимирующие диаграммы, полученные по зависимостям (5) с коэффициентами (6), которые достаточно удовлетворительно описывают эксперименты.

На рис. 4 в координатах  $\ln \dot{\epsilon}_i^c, T, \sigma_i$  изображена поверхность температурно-скоростного режима деформирования. Здесь цифрами I-IV показаны диаграммы, полученные сечением поверхности плоскостями  $\ln \dot{\epsilon}_i^c = \text{const}$ , что соответствует экспериментальным диаграммам рис. 3, а цифрами 1-5 — диаграммы, полученные сечением этой поверхности плоскостями  $T = \text{const}$ , что отвечает диаграммам 1-5 рис. 2. Буквой  $\Sigma$  отмечена экспериментальная диаграмма, полученная сечением поверхности плоскостью  $\sigma_i = \text{const}$  при монотонно растущей температуре. Из рис. 4 следует, что поверхность температурно-скоростных режимов деформирования для сплава ВТ-20 действительно монотонная, без каких-либо аномальных отклонений в рассматриваемой области  $\sigma_i, T$ .

На рис. 5 представлены данные экспериментов на растяжение с кручением трубчатых образцов с  $l = 30$  мм,  $d = 18$  мм,  $D = 21$  мм. Режимы нагрева  $T = T(t)$  и нагружения (осевого  $\sigma = \sigma(t)$  и касательного на кручение  $\tau = \tau(t)$ ) задавались произвольно, записыва-

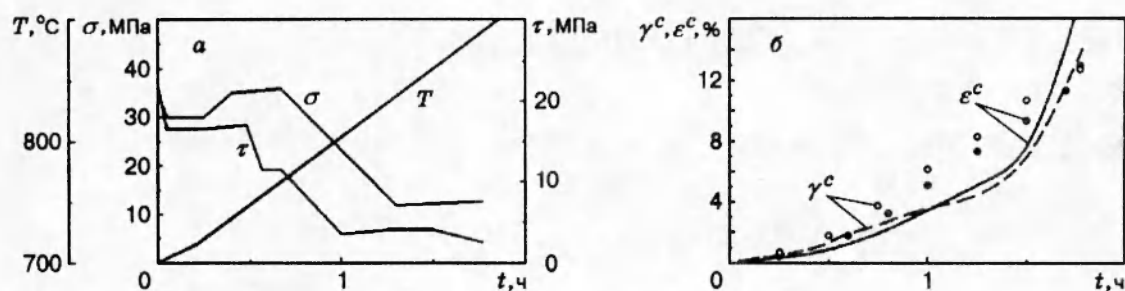


Рис. 5

лись на соответствующих приборах; их значения в виде диаграмм приведены на рис. 5, а. Экспериментальные данные осевой деформации  $\epsilon^c = \epsilon^c(t)$  и сдвиговой  $\gamma^c = \gamma^c(t)$  показаны на рис. 5, б точками, расчетные значения этих величин по (4)–(6) — линиями.

Таким образом, разработанная методика проведения экспериментов по определению диаграмм  $\sigma_i = \sigma_i(T)$  при фиксированных значениях  $\dot{\epsilon}_i^c = \text{const}$ , приведенных на рис. 3, действительно более универсальна, позволяет непосредственно выявить, к какой из двух групп относится данный материал, и в соответствии с этим выбрать аппроксимирующую зависимость. Для материалов с монотонным изменением характеристик зависимости типа (4) и (5) и разработанная применительно к ПЭВМ программа описывают процессы деформирования в широком температурно-силовом диапазоне при произвольно меняющихся значениях нагрузок и температур.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 93-01-16506).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Sosnin O. V., Gorev B. V. Fundamentals of near superplasticity process mechanics // Superplasticity in Advanced Materials: Proc. 1994 Int. Conf., Moscow, 1994. Acdermannsdorf: Trans. Tech. Publ., 1994. P. 621–626.
2. Цвелодуб И. Ю. Об оптимальных путях деформирования в условиях ползучести. Некоторые приложения к задачам обработки материалов давлением // Изв. АН СССР. МТТ. 1987. № 6. С. 128–136.
3. Соснин О. В., Горев Б. В., Ратничкин А. А. Закономерности деформирования металлов в режимах, близких к сверхпластичности // Проблемы нелинейной механики деформируемого твердого тела: Сб. науч. тр. Свердловск, 1990.
4. Соснин О. В., Соснин О. О. О термопластичности // Пробл. прочности. 1988. № 12. С. 3–9.
5. Соснин О. В., Горев Б. В., Раевская Г. А. Обработка материалов давлением в медленных режимах деформирования // Новые материалы и технологии. Теория и практика упрочнения материалов в экстремальных процессах. Новосибирск: Наука, 1992.
6. Кувшинов Г. А., Новиков И. И. Об оптимальной температуре сверхпластичности // Теплофизика конденсированных сред: Сб. ст. М.: Наука, 1985.
7. Горев Б. В., Клопотов И. Д. Методика построения кривых деформирования на кручение при больших деформациях // Завод. лаб. 1995. Т. 61, № 12. С. 50–54.

Поступила в редакцию 1/XI 1995 г.