

## Математическое моделирование реологического поведения сверхпластичных материалов в процессах локального формообразования

Ф. У. Еникеев

Институт проблем сверхпластичности металлов, Уфа, Башкирстан, Россия

*Рассмотрены некоторые особенности поведения сверхпластичных материалов при одноосном немономтонном нагружении (начальные участки диаграмм напряжение–деформация, испытания со скачкообразным изменением скорости, на релаксацию нагрузки и т.п.). Для описания механического отклика материала в переходных режимах нагружения предложено ввести в определяющее соотношение Смирнова скорость упругой деформации. Проанализированы возможности применения полученного таким образом соотношения для описания механического отклика сверхпластичных материалов при резком изменении скорости деформации. Показано, что в соответствии с теоретическими прогнозами скорость роста напряжения на участке активного нагружения превышает скорость его падения на этапе релаксации. Установлено, что такой прогноз противоречит экспериментальным данным, полученным на промышленном сплаве Supral-100 (Al–6%Cu–0,4%Zr) и модельном сплаве Вуда (Bi–25%Pb–12,5%Sn–12,5%Cd). Сделан вывод, что в рамках модели Смирнова не удастся одинаково хорошо описать поведение материала при активном нагружении с постоянной скоростью деформации и на этапе релаксации с использованием одного и того же набора постоянных материала. Это обстоятельство должно быть принято во внимание при проведении практических расчетов технологических параметров для процессов обработки давлением с немономтонным характером нагружения или деформирования.*

В процессах объемной и листовой штамповки с использованием явления сверхпластичности (СП) при получении деталей сложного профиля (например, при штамповке дисков автомобильных колес или пневмоформовке листовых материалов в штамповую оснастку, имеющую сложную гравюру штампа) в объеме деформируемого материала реализуется широкий спектр условий сверхпластического формообразования. При этом условия деформирования могут различаться не только по величине интенсивности скоростей деформаций, но и по характеру нагружения: в частности, на некоторых участках возможна реализация сложного немономтонного нагружения. Особенно большую актуальность проблема приобретает при практическом использовании процессов локального деформирования типа раскатки дисков автомобильных колес. В этом случае представляет интерес как анализ начальных участков диаграмм напряжение–деформация (при каждом проходе ролика степень локальной деформации относительно невелика), так и кривых релаксации (после каждого прохода ролика происходит процесс частичной разгрузки материала раскатываемого диска).

Метод локального формообразования является новым перспективным направлением использования эффекта СП в процессах обработки металлов давлением (ОМД), поскольку обладает высокой универсальностью, не требует мощного штампового оборудования и позволяет получать осесимметричные изделия типа валов, дисков, конусов и др. из малопластичных и труднодеформируемых сплавов. Однако локальный характер приложения

нагрузки приводит к тому, что в очаге деформации реализуется объемное напряженно-деформированное состояние, а процесс нагружения имеет немонотонный (почти периодический) характер. В связи с вышеизложенным представляет интерес анализ поведения сверхпластичных материалов при немонотонном деформировании с целью обнаружения области применимости известных определяющих соотношений (ОС), что необходимо для их обоснованного использования в постановках краевых задач механики обработки давлением с использованием явления СП.

Цель настоящей работы – анализ применимости некоторых известных определяющих соотношений для описания механического поведения сверхпластичных материалов при переходных режимах одноосного деформирования (начальные участки диаграмм напряжение–деформация, испытания со скачкообразным изменением скорости, на релаксацию нагрузки и т.п.).

Ниже основное внимание уделено анализу модели Смирнова [1], предназначенной для описания механического поведения сверхпластичных материалов при стационарных режимах одноосного деформирования. Согласно модели, связь между напряжением  $\sigma$  и скоростью деформации  $\dot{\xi}$ , соответствующими установившейся стадии пластического течения, определяется соотношением дробно-рационального вида [1]:

$$\sigma = \sigma_S \frac{\sigma_0 + K_V \dot{\xi}^{m_V}}{\sigma_S + K_V \dot{\xi}^{m_V}}, \quad \dot{\xi} \neq 0, \quad (1)$$

где  $\sigma_0$ ,  $\sigma_S$ ,  $K_V$  и  $m_V$  – постоянные материала. Выражение (1) может быть переписано для скорости деформации в следующем виде:

$$\dot{\xi} = \begin{cases} 0, & \sigma \leq \sigma_0; \\ \left[ \frac{\sigma_S}{K_V} \frac{\sigma - \sigma_0}{\sigma_S - \sigma} \right]^{1/m_V}, & \sigma > \sigma_0. \end{cases} \quad (1')$$

Модель Смирнова широко используется в практических расчетах технологических параметров различных процессов ОМД в состоянии СП. Многочисленные экспериментальные исследования убедительно показали применимость модели (1) для описания механического поведения сверхпластичных материалов на стационарной стадии пластического течения; принято считать [2], что соотношение (1) справедливо в неограниченном диапазоне скоростей деформации.

Рассмотрим некоторые особенности испытаний со скачкообразным изменением скорости деформации. В этих экспериментах скорость активного захвата изменяется скачком, зависимость осевого усилия  $P$  от времени  $t$  регистрируется самописцем. Типичный вид экспериментальной диаграммы иллюстрирует рис. 1. В работах [3, 4] представлены различные физические соображения относительно того, каким образом следует обрабатывать эту диаграмму при вычислении параметра  $m$ , входящего в простейшее степенное ОС СП:

$$\sigma = K\xi^m, \quad (2)$$

где  $K$  – постоянная материала. В этих же работах рассматриваются четыре различных способа определения параметра  $m$  из одной и той же диаграммы (рис. 1). В данной работе этот вопрос не обсуждается. Основное внимание уделяется следующей стороне проблемы: могут ли известные ОС типа (1), (2) и др. хотя бы качественно описать такого рода экспериментальные диаграммы – особенно их переходные зоны от одного установившегося режима к другому?

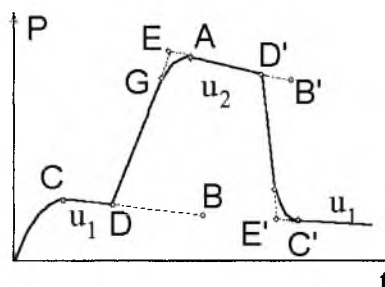


Рис. 1. Типичный вид экспериментальной зависимости величины осевого усилия  $P$  от времени  $t$ , регистрируемый при испытаниях на растяжение со скачкообразным изменением скорости деформации [3, 4].

Для того чтобы ответить на этот вопрос, представим следующую схему эксперимента: пусть имеется идеальная абсолютно жесткая безынерционная испытательная машина, позволяющая реализовать ступенчатый по скорости деформации режим нагружения (рис. 2,а). Зададимся вопросом: каким будет отклик материала на такую программу нагружения по прогнозу соотношений (1) и (2). Легко видеть, что согласно (1) или (2) при скачкообразном изменении скорости деформации напряжение течения  $\sigma$  также изменяется скачкообразно (рис. 2,б). В то же время хорошо известно, что на практике обычно наблюдается более сложная картина: в момент переключения скоростей напряжение течения изменяется не сразу, а постепенно, как показано штриховыми линиями на рис. 2,б. При остановке активного захвата напряжение течения также не сразу падает до нуля, а снижается по убывающему закону; принято говорить, что имеет место релаксация напряжений. Таким образом, ОС (1) и (2) не описывают поведение СП материала в переходных режимах нагружения (при резком изменении скорости деформации).

Почему же ОС (1) и (2) не описывают переходные эффекты? Очевидно, по двум основным причинам: либо испытательная машина не обеспечивает мгновенное переключение скорости деформации, либо ОС указанного типа не вполне адекватно описывают поведение материала в таких переходных режимах нагружения. Предположим сначала, что испытательная машина идеальная, и основное внимание уделим вопросам неидеальности ОС и испытательной машины (конечной жесткости и инерционности системы уравнения), что будет рассмотрено ниже.

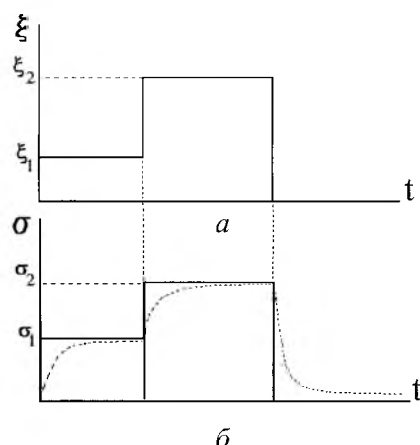


Рис. 2. Идеализованная схема испытания со скачкообразным изменением скорости: *a* – программа нагружения; *б* – отклик материала.

Сверхпластическая деформация характеризуется очень большими пластическими деформациями; величина относительного удлинения  $\delta$  может достигать сотен и тысяч процентов. Отсюда следует, что при сверхпластическом деформировании упругие деформации практически всегда заведомо значительно меньше пластических, поэтому их обычно не принимают во внимание при анализе механического отклика поликристаллических материалов, деформируемых в режиме СП. В то же время характерной особенностью нестационарных режимов нагружения является отличие от нуля производной напряжения по времени ( $d\sigma/dt \neq 0$ ), что приводит к появлению отличной от нуля скорости упругой деформации  $\xi_e$  (*e* – elastic):  $\xi_e = (1/E_s)d\sigma/dt$ , где  $E_s$  – модуль Юнга материала, из которого изготовлен образец. Естественно предположить, что поведение сверхпластического материала при переходных режимах нагружения можно описать, по крайней мере, качественно, если принять во внимание вклад упругого члена в общую скорость деформации  $\xi = \xi_e + \xi_c$ , где  $\xi_c$  (*c* – creep) – скорость деформации ползучести, определяемая выражением типа (1) или (2).

Предположим, что характеристики испытательной машины могут быть описаны линейно-упругим элементом с модулем упругости  $E_m$ . Тогда влияние конечной жесткости испытательной машины может быть принято во внимание путем введения в рассмотрение эффективного модуля  $E$  системы образец–машина, величину которого можно вычислить по формуле  $E = E_s E_m / (E_s + E_m)$ . Для абсолютно жесткой машины ( $E_m / E_s \rightarrow \infty$ )  $E = E_s$ ; если же машина, наоборот, слишком “мягкая” для данного образца ( $E_m / E_s \rightarrow 0$ ), то  $E = E_m$ .

Теперь рассмотрим, какое влияние может оказать инерционность траверсы. Типичным для СП материалов значением скорости деформации является  $\xi_{typ} = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ , характерный масштаб времени в этом случае равен  $\tau_{typ} = 1/\xi_{typ} = 1000 \text{ с}$ . Таким образом, влияние фактора инерционности траверсы будет тем заметнее, чем более сопоставимыми окажутся характерное время торможения траверсы  $t^*$  и характерный масштаб  $\tau_{typ}$ .

Современные испытательные машины фирмы “Instron” или “Schenc”, которые обычно используются для проведения механических испытаний, обеспечивают время переключения скорости активного захвата существенно меньше 1 с. Следовательно, фактор инерционности траверсы, вообще говоря, не должен оказывать значительного влияния на полученные результаты. В пользу такой точки зрения свидетельствуют также результаты, полученные в работе [5], где показано, что инерционность траверсы сильно искажает кривые релаксации тела Бингама в том случае, когда характерное время торможения траверсы имеет порядок 10 с и более. Тем не менее необходимо помнить, что влияние этого фактора может оказаться существенным, например, при исследовании высокоскоростной СП.

Рассмотрим типичное испытание на релаксацию. Пусть при  $0 \leq t \leq t_k$  имеет место активное нагружение с постоянной скоростью деформации  $\xi = \xi_k = \text{const}$  (рис. 3). В момент времени  $t = t_k$  активная траверса останавливается и регистрируется кривая релаксации. Введем в рассмотрение следующие параметры экспериментальной кривой, показанной на рис. 3:  $\tau_{1/2}$  и  $\tau_{1/2R}$  – временные характеристики соответственно скорости нарастания напряжения на этапе активного нагружения и скорости его падения на этапе релаксации;  $k$  – параметр, равный их отношению:

$$\sigma(\tau_{1/2}) = \frac{1}{2}[\sigma_k + \sigma_0]; \quad \sigma(\tau_{1/2R}) = \frac{1}{2}[\sigma_k + 3\sigma_0], \quad k = \frac{\tau_{1/2}}{\tau_{1/2R}}, \quad (3)$$

где  $\sigma_k = \sigma(t_k)$  – напряжение непосредственно перед остановкой траверсы.

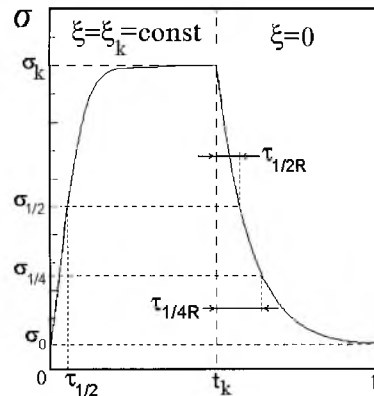


Рис. 3. Кривая релаксации:  $\sigma_{1/2} = \sigma(\tau_{1/2R}) = \frac{1}{2}[\sigma_k + \sigma_0]$ ;  $\sigma_{1/4} = \sigma(\tau_{1/4R}) = \frac{1}{2}[\sigma_k + 3\sigma_0]$ .

В [6] проанализировано поведение материала, свойства которого могут быть описаны соотношением вида

$$\xi = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} + C\sigma^n, \quad (4)$$

где  $C$  и  $n=1/m$  – постоянные материала;  $E$  – эффективный модуль упругости системы образец–машина.

Выражение (4) представляет собой обобщение ОС (2) на случай немонотонного одноосного деформирования. Как показано в [6], в рамках модели (4) для параметра  $k$  имеет место следующее приближение:  $k \approx m \leq 1$ . Для апробации полученных результатов были выполнены испытания на сжатие образцов из сплава Вуда (Bi–25%Pb –12,5%Sn–12,5%Cd) при комнатной температуре на испытательной машине фирмы “Schenc”. Для подготовки ультрамелкозернистой структуры использовали выдавливание прутков  $\varnothing 8$  мм из слитка  $\varnothing 25 \times 35$  мм. Образцы  $\varnothing 8 \times 12$  мм с концентрическими канавками на торцах для удержания смазки (графит в солидоле) испытывали на сжатие при  $20^\circ\text{C}$  и постоянной скорости деформирования  $0,1 \dots 1$  мм/мин. Для каждого образца после активного нагружения снималась также кривая релаксации (зависимость величины осевого усилия от времени после остановки активного захвата). Результаты обработки полученных данных приведены в табл. 1. Как видно, во всех случаях экспериментально измеренные значения параметра  $k$  заметно больше единицы, что резко противоречит теоретическому прогнозу  $k \approx m$ . Рис. 4 иллюстрирует типичную для всех испытанных образцов диаграмму напряжение–время, которая сопоставляется с теоретическими кривыми, рассчитанными при разных комбинациях постоянных материала: если для кривой 1 постоянные  $E$  и  $m$  найдены путем аппроксимации активного участка кривой  $\sigma - t$ , то для кривой 2 – путем аппроксимации кривой релаксации. Это хорошо видно из самого рис. 4: если кривая 1 удовлетворительно описывает активный участок, то на пассивном участке она существенно отличается от экспериментальной кривой. Для кривой 2 наблюдается обратная картина: она хорошо описывает кривую релаксации, однако на активном участке сильно отличается от экспериментальной кривой.

Т а б л и ц а 1

Экспериментальные данные для сплава Вуда [6]

$\sigma_k$ , МПа	$\xi_k \cdot 10^4$ , с <sup>-1</sup>	$\tau_{1/2}$ , с	$\tau_{1/2R}$ , с	$k$	$d\sigma / d\varepsilon$ , МПа
10,2	1,28	180	17	10,6	282
13,2	2,27	75	11	6,8	408
14,8	2,61	96	13	7,4	368
17,1	3,90	60	8	7,5	440
20,0	4,86	36	7	5,1	582
21,0	6,34	50	7	7,1	550

В связи с вышеизложенным представляет интерес провести аналогичный анализ для модели Смирнова (1). С этой целью рассмотрим следующее обобщение последней:

$$\dot{\xi} = \dot{\xi}_e + \dot{\xi}_c = \frac{\dot{\sigma}}{E} + \left[ \frac{\sigma_S}{K_V} \frac{\sigma - \sigma_0}{\sigma_S - \sigma} \right]^{1/m_V}, \quad \sigma > \sigma_0, \quad (5)$$

где  $E$  – эффективный модуль упругости системы образец–машина.

В работе [7] выполнен детальный теоретический анализ поведения материала, свойства которого могут быть описаны соотношением (5), при испытаниях с немонотонным изменением скорости деформации. В частности, проведенные в [7] расчеты параметров  $\tau_{1/2}$  и  $\tau_{1/2R}$  позволили установить, что в рамках модели (5) величина их отношения  $k = \tau_{1/2} / \tau_{1/2R}$  не должна превышать 1 (расчеты проводились для сплавов ВТЗ-1, Al–12%Si, Al–33%Cu, Al–6%Cu–0,4%Zr и Supral).

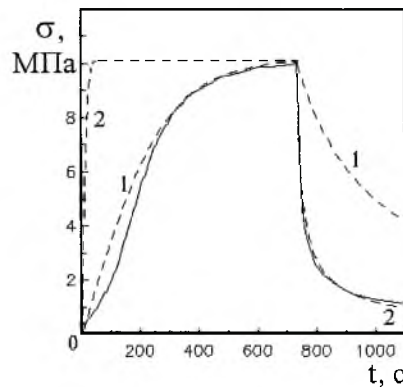


Рис. 4. Зависимость напряжения  $\sigma$  от времени  $t$  для сплава Вуда при комнатной температуре (сплошная линия). Пунктиром показаны теоретические кривые, полученные при разных комбинациях постоянных материала [6]: 1 –  $m = 0,4$ ,  $E = 4300$  МПа; 2 –  $m = 0,5$ ,  $E = 280$  МПа.

Апробацию полученных теоретических результатов осуществляли на примере промышленного алюминиевого сплава марки Supral-100 (Al–6%Cu–0,39%Zr–0,06%Si–0,16%Fe–0,033%Zn–0,004%Ti–0,002%Mg)\*. Эксперименты проводили на электромеханической испытательной машине Schenc Trebel при температуре 430...490°C и скорости движения активной траверсы 0,05...5 мм/мин. Образцы с размерами рабочей части 2 × 5 × 12 мм и радиусом галтели  $R = 5$  мм вырезали вдоль направления прокатки. Во всех случаях, когда образец не разрушался в ходе испытания, записывались кривые релаксации. Для повышения точности измерений скорость ленты самописца при записи начальных участков диаграмм усилие–время и кривых релаксации выбиралась равной 6...60 см/мин; части диаграмм, соответствующие стационарной стадии пластического течения, записывались при скорости движения ленты 0,1...3 см/мин. Оптимальные температурно-скоростные условия СП были определены стандартными методами, они хорошо согласуются с данными других авторов [8].

\* Эксперименты выполнены совместно с К. Мурали в Индийском технологическом институте (г. Мадрас, Индия).

## Сопоставление расчетных данных с экспериментальными для сплава Supral [7]

$\xi_k, \text{с}^{-1}$	$\sigma_\varepsilon = \frac{d\sigma}{d\varepsilon},$ МПа	$\sigma_k,$ МПа	$\tau_{1/2}$		$\tau_{1/2R}$		$k$	
			Расчет	Экспе- римент	Расчет	Экспе- римент	Расчет	Экспе- римент
$1,82 \cdot 10^{-4}$	$70 \pm 20$	2,87	83,00	$72,0 \pm 24,0$	107,00	$6,00 \pm 1,00$	0,78	12,0
$2,53 \cdot 10^{-4}$	$120 \pm 20$	3,34	44,00	$57,0 \pm 12,0$	57,70	$7,50 \pm 1,00$	0,76	7,6
$1,0 \cdot 10^{-3}$	$420 \pm 200$	7,13	8,14	$9,0 \pm 3,0$	11,30	$4,00 \pm 1,00$	0,72	2,3
$1,8 \cdot 10^{-3}$	$240 \pm 100$	9,44	11,40	$7,5 \pm 2,5$	16,30	$1,32 \pm 0,60$	0,70	5,7
$4,76 \cdot 10^{-3}$	$270 \pm 90$	15,50	6,41	$5,0 \pm 2,0$	10,20	$1,28 \pm 0,50$	0,63	3,9
$1,93 \cdot 10^{-2}$	$450 \pm 100$	26,60	1,59	$1,2 \pm 0,6$	3,64	$0,41 \pm 0,20$	0,44	2,9

**Примечания:**  $\sigma_\varepsilon$  – начальный наклон кривой  $\sigma - \varepsilon$  (при расчетах принимали  $E = \sigma_\varepsilon$ );  $k = \tau_{1/2} / \tau_{1/2R}$ .

В табл. 2 сопоставлены полученные экспериментальные и расчетные данные. Как видно, во всех случаях расчетное значение  $k$  меньше 1 и существенно меньше экспериментально измеренных величин. Таким образом, теоретический прогноз в рамках моделей (4) и (5) оказался одинаковым ( $k \leq 1$ ), что резко противоречит экспериментальным данным (табл. 1 и 2).

Полученные выше результаты не означают, что модели (4) и (5) в принципе не позволяют описывать экспериментальные кривые релаксации. Можно показать, что кривые релаксации могут быть хорошо описаны в рамках обеих этих моделей, если для описания релаксационной кривой выбрать параметр  $E$  примерно на порядок больший, чем найденный из начального наклона кривой  $\sigma - \varepsilon$ . Однако при этом следует подчеркнуть, что как в рамках модели (4), так и (5) не удастся одинаково хорошо описать *оба* участка экспериментальной диаграммы типа показанных на рис. 3 и 4 с использованием *одного и того же* набора постоянных материала. Это обстоятельство должно быть принято во внимание при моделировании процессов ОМД, характеризующихся немонотонным во времени характером изменения напряжения или скорости деформации. Очевидно, что данная проблема заслуживает проведения дополнительных исследований в этом направлении.

Таким образом, модель Смирнова может быть с успехом использована для описания механического поведения сверхпластичных материалов при однократном резком изменении скорости деформации, если ввести в нее скорость упругой деформации. Однако при многократном скачкообразном изменении скорости деформации не удастся описать *всю* экспериментальную диаграмму в рамках модели Смирнова с использованием *одного и того же* набора констант материала.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант РФФИ 99-01-01032.



**Резюме**

Розглянуто деякі особливості поведінки надпластичних матеріалів при одно-вісному немонотонному навантаженні (початкові ділянки діаграм напруга-деформація, випробування зі стрибкоподібною зміною швидкості, на релаксацію навантаження і т.п.). Для опису механічного відклику матеріалу в перехідних режимах навантаження запропоновано ввести в визначальне співвідношення Смирнова швидкість пружної деформації. Проаналізовано можливості використання отриманого таким чином співвідношення для опису механічного відклику надпластичних матеріалів при різкій зміні швидкості деформації. Показано, що згідно з теоретичними прогнозами швидкість росту напруги на ділянці активного навантаження перевищує швидкість її спаду на етапі релаксації. Установлено, що такий прогноз суперечить експериментальним даним, що отримані на промисловому сплаві Supral-100 (Al-6%Cu-0,4%Zr) та модельному сплаві Вуда (Bi-25%Pb-12,5%Sn-12,5%Cd). Зроблено висновок, що в рамках моделі Смирнова немає можливості однаково добре описати поведінку матеріалу при активному навантаженні з постійною швидкістю деформації і на етапі релаксації з використанням одного і того ж набору постійних матеріалу. Цю обставину необхідно враховувати при проведенні практичних розрахунків технологічних параметрів для процесів обробки тиском із немонотонним характером навантаження або деформування.

1. *Смирнов О. М.* Обработка металлов давлением в состоянии сверхпластичности. – М.: Машиностроение, 1979. – 184 с.
2. *Смирнов О. М., Щерба В. Н.* Влияние реологических свойств легких сплавов на особенности их течения при прессовании // Изв. вузов. Сер. Цвет. металлургия. – 1997. – № 1. – С. 26 – 32.
3. *Hedworth J., Stowell M. J.* The measurement of strain rate sensitivity in superplastic alloys // J. Mater. Sci. – 1971. – 6. – P. 1061 – 1069.
4. *Грабский М. В.* Структурная сверхпластичность металлов / Пер. с польск. – М.: Металлургия, 1975. – 272 с.
5. *Vasin R. A., Enikeev F. U., Mazurski M. I.* Applicability of Bingham-type constitutive models to superplastic materials at different loading conditions // Materials Science Forum. – 1994. – 170-172. – P. 675 – 680.
6. *Васин Р. А., Еникеев Ф. У.* Введение в механику сверхпластичности: В 2 ч. Ч. 1. – Уфа: Гилем, 1998. – 280 с.
7. *Padmanabhan K. A., Vasin R. A., Enikeev F. U.* Superplastic Flow Phenomenology and Mechanics. – Berlin: Springer-Verlag, 2001. – 430 p.
8. *Bricknell R. H., Bentley A. P.* The activation energy for superplastic flow in Al-6Cu-0.4Zr // J. Mater. Sci. – 1979. – 14. – P. 2547 – 2554.

Поступила 04. 10. 99