

PACS: 62.20.fq, 62.20.Fe

Л.С. Метлов<sup>1,2</sup>, М.М. Мышляев<sup>3,4</sup>, А.Г. Петренко<sup>2</sup>

## МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ СКОРОСТНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ ТЕЧЕНИЯ И ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ

<sup>1</sup>Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина

<sup>2</sup>Донецкий национальный университет

<sup>3</sup>Институт физики твердого тела РАН

<sup>4</sup>Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова

Статья поступила в редакцию 10 января 2017 года

*В рамках феноменологического подхода описаны эволюция структурных дефектов и кривые упрочнения–разупрочнения для сверхпластичных материалов в процессе их деформирования. Исследовано изменение коэффициента скоростной чувствительности напряжения течения и коэффициента деформационного упрочнения в упрощенном и точном вариантах.*

**Ключевые слова:** сверхпластичность, упрочнение, ослабление, коэффициент скоростной чувствительности напряжения течения, коэффициент деформационного упрочнения

### 1. Введение

Сверхпластичность является одним из наиболее загадочных явлений современной науки. Для ее объяснения предложены различные модели. В числе первых был предложен роликовый механизм сверхпластичности, согласно которому зерна в процессе деформирования вращаются в одном и том же направлении [1]. Однако направление вращения не предопределено симметрией задачи, а материал в соседних зернах, разделенный границей контакта, движется во взаимно противоположных направлениях.

В [2,3] изложена концептуальная основа модели сверхпластической деформации (СПД), которая базируется на представлениях о полосах кооперированного зернограницного проскальзывания. Модель не учитывает кинетический характер взаимосвязи между макропараметрами теории, за исключением чисто геометрического уравнения, устанавливающего взаимосвязь между скоростью деформирования и средним числом полос кооперированного зернограницного проскальзывания, зависящих от действующих напряжений (см. формулу (1) в [2]).

Подобное соотношение в [4,5] трактуется исходя из механизма зернограничного проскальзывания, основанного на представлениях о локальном плавлении. Для алюминиевых сплавов, обладающих высокоскоростной сверхпластичностью, эффект локального плавления связывается с сегрегацией на межкристаллитных и межфазных границах магния, кремния и некоторых других элементов, что приводит к смещению точки солидуса. Эта концепция может быть естественным образом дополнена концепцией сдвигового плавления [6–8], которое развивается при высоких скоростях проскальзывания, т.е. при высоких скоростях деформирования, что и отмечается в [4].

В основу термодинамической теории сверхпластичности, предложенной в [9–12], положено некоторое кинетическое уравнение. Оно основывается на концепции «потенциальной» функции, формально совпадающей с функционалом свободной энергии в теории фазовых переходов 2-го рода. При этом уравнение состояния записано в конечной форме и дополнено кинетическими уравнениями для управляющего параметра и внутренних параметров состояния. Природа внутренних процессов, связанная с модификацией дефектных подсистем, не конкретизируется. Этот подход, скорее всего, есть один из вариантов *теории фазовых полей*, интенсивно разрабатываемых в современной теории применительно к различным задачам.

Теория сверхпластичности, основанная на концепции кооперативного движения дефектов и перестраиваемого потенциального рельефа, базируется на синергетических представлениях [13]. Основное внимание в ней уделяется структурному аспекту.

С позиций структурной сверхпластичности деформация осуществляется за счет движения граничных дислокаций (дислокаций «ориентационного» несоответствия), а также уступов, образующихся после выхода на границу решеточных дислокаций [14–16]. В модели учитываются три типа дефектов – кроме вышеназванных, еще и границы зерен. Для описания эволюции дислокаций «ориентационного» несоответствия, а также делокализованных уступов кинетические уравнения выписываются в явном виде [15]:

$$\begin{aligned} \dot{\rho}_b &= \xi \dot{\epsilon}_v / b - \rho_b / t_p, \\ \dot{w}_l &= \rho_b \Delta b_l / t_l - w_l / t_w, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\rho_b$  и  $w_l$  – плотности дислокаций соответственно ориентационного несоответствия и скользящих компонент вектора Бюргера;  $\xi$  – геометрический множитель, характеризующий однородность дислокационного потока, падающего на границы зерен;  $\dot{\epsilon}_v$  – скорость внутризеренной деформации;  $b$ ,  $\Delta b_l$  – векторы Бюргера соответственно решеточной дислокации и скользящих компонент делокализованных дислокаций;  $t_p$ ,  $t_w$  – время диффузионного «ухода» из границы дислокаций ориентационного несоответствия и скользящих компонент делокализованных дислокаций соответственно.

Отдельного кинетического уравнения для границ зерен не предполагается, но используется некоторая эмпирическая временная зависимость типа

$$d^a - d_0^a = \alpha(\dot{\epsilon})t, \quad (2)$$

где  $d_0^a$  и  $d^a$  – исходный и текущий размеры зерна;  $a = 2-3$  – показатель степени;  $\alpha(\dot{\epsilon})$  – параметр, зависящий от скорости деформации  $\dot{\epsilon}$ , диффузионных констант материала, структурных параметров и условий деформации. С течением времени размер зерен растет.

С другой стороны, полную накопленную деформацию среды можно представить как сумму деформации по границам зерен в результате движения граничных дислокаций и деформации по объему зерна вследствие движения решеточных дислокаций. Соответственно для скоростей деформаций будет справедливо представление

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_b + \dot{\epsilon}_v. \quad (3)$$

Первое слагаемое задается реологическим уравнением вида [16]:

$$\dot{\epsilon}_b = A_b \left( \frac{\sigma}{G} \right)^2 \left( \frac{b}{d} \right)^2 \left( \frac{G\Omega}{k_B T} \right) \left( \frac{D_b \delta}{b^3} \right), \quad (4)$$

где  $A_b$  – численный коэффициент, равный  $\sim 100$ ,  $\sigma$  – напряжение течения,  $G$  – модуль сдвига,  $d$  – средний размер зерна,  $\Omega$  – атомный объем,  $k_B$  – постоянная Больцмана,  $T$  – абсолютная температура,  $D_b$  – коэффициент поперечной диффузии,  $\delta$  – ширина границы зерна.

Второе слагаемое задается уравнением степенной ползучести

$$\dot{\epsilon}_v = A_v \left( \frac{\sigma}{G} \right)^n \frac{D_v}{b^2} \left( \frac{G\Omega}{k_B T} \right), \quad (5)$$

где  $A_v$  – постоянная Дорна,  $D_v$  – коэффициент объемной диффузии,  $n = 3-4$  – численный коэффициент [16].

Пластическая деформация может осуществляться за счет как внутризеренного скольжения решеточных дислокаций, так и межзеренного скольжения с участием зернограничных дислокаций. Межзеренное скольжение не есть исключительное свойство сверхпластичности. Последняя возникает при сохранении равномерности деформирования по длине образца. Критерием устойчивости однородного течения является большая величина коэффициента скоростной чувствительности напряжения течения.

Ранее одним из авторов для описания процессов дефектообразования при интенсивных пластических деформациях (ИПД) был предложен метод неравновесной эволюционной термодинамики (НЭТ) [17–20], который облада-

ет достаточной общностью и был применен также для теоретического решения других задач [7,21–23]. Представляет интерес приложить этот метод и для описания такого сложного явления, как сверхпластичность. Предварительное обсуждение данной проблемы предпринято авторами в работе [24], где в общем виде обсуждены вопросы сходства и различия между процессами ИПД и сверхпластичности, но не предложено аналитическое решение.

## 2. Система кинетических уравнений сверхпластичности в рамках НЭТ

Известно, что в процессе ИПД достигается некоторый минимальный размер зерен, после чего материал можно подвергать дальнейшей пластической деформации без разрушения, которая способна достигнуть 1000% и более. В то же время с ростом количества циклов наблюдается деградация структуры материала [25,26], которая ассоциируется с его разрушением. Сверхпластичные материалы также можно деформировать до больших степеней, после чего они макроскопически разрушаются.

Предположим, что макроскопическое разрушение в случае СПД происходит в результате накопления в процессе деформирования некоторого дополнительного дефекта структуры, не учитывавшегося ранее. Это могут быть микротрещины при ИПД и микротрещины и дефекты границ зерен при СПД. В начале процессов ИПД наиболее интенсивно генерируются такие дефекты, как дислокации и границы зерен, в результате чего достигается «стационарное» состояние системы с некоторым предельным размером зерна. Дефекты следующего уровня на этой стадии развиться еще не успевают, и если обработку прекратить, то материал будет обладать наилучшими свойствами с точки зрения достигнутой структуры. В случае продолжения обработки дефекты второго уровня будут накапливаться до такой степени, что для обычных (не сверхпластичных) материалов свойства будут деградировать. Следует отметить, что существенную роль в замедлении кинетики накопления микротрещин будет играть противодавление [27].

Качественно такая же картина имеет место в случае сверхпластичности. Поэтому для правильного описания нужно одновременно учитывать кинетику дефектов и основного, и более глубокого (скрытого) уровня. С учетом данного обстоятельства систему кинетических уравнений для описания явления сверхпластичности можно записать в виде [28]:

$$\frac{\partial h_g}{\partial t} = \gamma_g (\varphi_{0g} - \varphi_{1g} h_g + \varphi_{gD} h_D), \quad (6)$$

$$\frac{\partial h_D}{\partial t} = \gamma_D (\varphi_{0D} - \varphi_{1D} h_D + \varphi_{gD} h_g), \quad (7)$$

где  $h_g$ ,  $h_D$  – плотности соответственно границ зерен и граничных дислокаций;  $\gamma_g$ ,  $\gamma_D$  – кинетические коэффициенты;  $\varphi_{im}$  ( $i = 0, 1, \dots; m = g, D$ ) – коэффициенты степенного представления, которые (особенно при низших степенях) в свою очередь зависят от упругих деформаций  $\varepsilon_{ij}^e$  [28]:

$$\begin{aligned}\Phi_{0m} &= \Phi_{0m}^* - g_m \varepsilon_{ii}^e + \left( \frac{1}{2} \bar{\lambda}_m (\varepsilon_{ii}^e)^2 + \bar{\mu}_m (\varepsilon_{ij}^e)^2 \right), \\ \Phi_{1m} &= \Phi_{1m}^* - 2e_m \varepsilon_{ii}^e,\end{aligned}\quad (8)$$

где  $\varepsilon_{ii}^e$  и  $(\varepsilon_{ij}^e)^2 = \varepsilon_{ij}^e \varepsilon_{ji}^e$  – соответственно первый и второй инварианты тензора деформаций;  $\bar{\lambda}_m$ ,  $\bar{\mu}_m$  – коэффициенты, дающие поправки в упругие постоянные Ламе по каждому из типов дефектов.

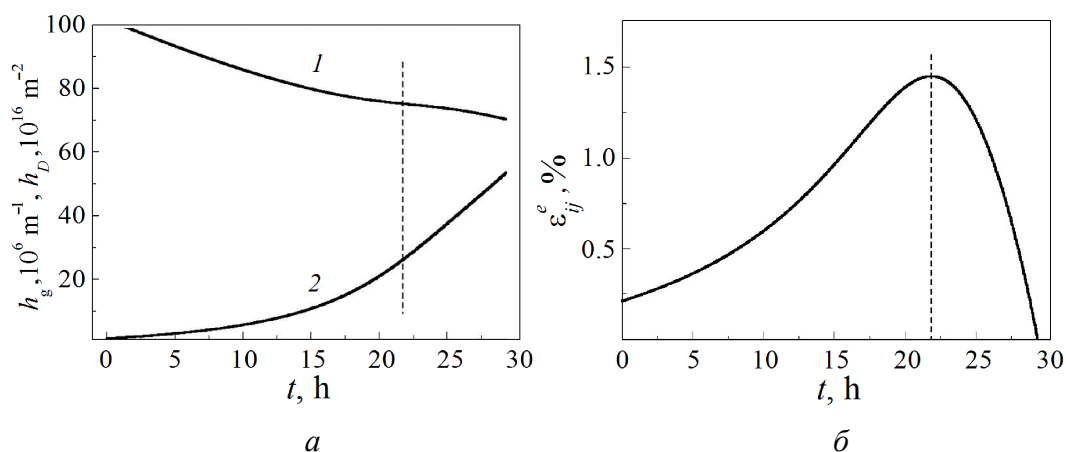
В отличие от (1) здесь учитывается только один вид структурного дефекта более глубокого уровня – зернограничные дислокации в их классическом смысле. Полагается, что уступы, возникающие вследствие выхода решеточных дислокаций, будут приводить в основном к миграции границ. Кинетика границ зерен здесь учтена явно отдельным эволюционным уравнением (6). Для однозначного описания эволюции системы необходимо задать начальные значения переменных состояния  $h_g$  и  $h_D$ .

Кроме того, согласно (8) необходимо задать закон изменения упругих напряжений  $\sigma_{ij}$  (или упругих деформаций  $\varepsilon_{ij}^e = E_{ijkl} \sigma_{kl}$ ), действующих в системе. Для обычного ИПД, для которого одним из главных дефектов являются решеточные дислокации, таким законом может служить соотношение Тейлора  $\sigma = \sigma_0 + A \sqrt{\rho_D}$  (или через упругие сдвиговые деформации  $\varepsilon^e = \varepsilon_0^e + A^* \sqrt{\rho_D}$ ). Можно предположить, что аналогичный механизм упрочнения действует и в случае граничных дислокаций с тем, однако, отличием, что задача стала двумерной (граница вместо объема). В соответствии с этим изменится размерность тормозящей силы, и аналог соотношения Тейлора будет иметь вид

$$\varepsilon^e = \varepsilon_0^e + Ah_d - Bh_d^2. \quad (9)$$

Здесь первое слагаемое – предел начала движения граничных дислокаций, второе слагаемое – упрочнение (торможение) на «лесу» граничных дислокаций, последнее слагаемое – «ослабление» материала за счет проскальзывания по границам зерен при большом количестве граничных дислокаций (возможно, за счет эффектов локального плавления).

На рис. 1,а приведена кинетика границ зерен и граничных дислокаций при параметрах, взятых для расчетов (обоснование выбора параметров см. в [28]):  $\Phi_{0d}^* = 2 \cdot 10^{-9} \text{ J} \cdot \text{m}^{-1}$ ,  $\Phi_{1d}^* = -4 \cdot 10^{-25} \text{ J} \cdot \text{m}$ ,  $g_d = 2 \cdot 10^{-8} \text{ J} \cdot \text{m}^{-1}$ ,  $\bar{\mu}_d = 3.3 \cdot 10^{-4} \text{ J} \cdot \text{m}^{-1}$ ,  $e_d = 0$ ,  $\Phi_{0g}^* = 0.4 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$ ,  $\Phi_{1g}^* = 3 \cdot 10^{-6} \text{ J} \cdot \text{m}^{-1}$ ,  $g_g = 12 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$ ,  $\bar{\lambda}_g = 2.5 \cdot 10^5 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$ ,  $\bar{\mu}_g = 6 \cdot 10^5 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$ ,  $e_g = 3.6 \cdot 10^{-4} \text{ J} \cdot \text{m}^{-1}$ ,  $\Phi_{gD} = 10^{-16} \text{ J}$ ,  $\varepsilon_{ii}^e = 0.2 \cdot 10^{-2}$ ,  $\varepsilon_0^e = 0.2\%$ ,  $A = 10^{-19} \text{ m}$ ,  $B = 2 \cdot 10^{-37} \text{ m}^2$ ,  $\gamma_g = 1.7$ ,  $\gamma_D = 0.5 \cdot 10^{20}$ .



**Рис. 1.** Эволюция системы при сверхпластической деформации: *a* – плотность границ зерен (кривая 1) и граничных дислокаций (кривая 2); *б* – упрочнение ( $\varepsilon_{ij}^e$  – интенсивность упругих сдвиговых деформаций). До максимума материал упрочняется, после – разупрочняется

Видно, что плотность границ зерен в процессе СПД уменьшается, что соответствует росту среднего размера зерна практически точно в соответствии с зависимостью (2). Кривая, рассчитанная численно по формулам (2), накладывается на кривую 1 на рис. 1,а, поэтому отдельно не приводится. Плотность же граничных дислокаций все время возрастает, обеспечивая переход от стадии упрочнения к стадии разупрочнения. Кривая упрочнения–разупрочнения приведена на рис. 1,б и в какой-то момент времени имеет точку максимума. Вид кривой аналогичен виду экспериментальных кривых (см. рис. 1,а в работе [15]). Время жизни образца определяется достижением интенсивности действующих упругих сдвиговых деформаций  $\varepsilon_{ij}^e$  нулевого значения, что соответствует разгрузке в результате разрыва.

### 3. Эффективные критерии сверхпластичности

Как известно, чтобы материал деформировался сверхпластически, должны выполняться определенные условия (критерии) для коэффициента скоростной чувствительности напряжения течения

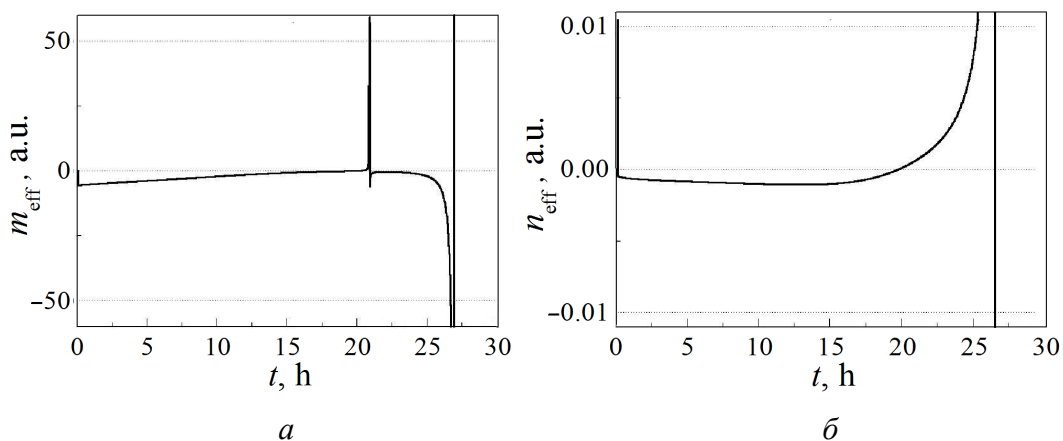
$$m = d \log \sigma / d \log \dot{\varepsilon} \geq 0.4 \quad (10)$$

и коэффициента деформационного упрочнения

$$n = d \log \sigma / d \log \varepsilon. \quad (11)$$

Поскольку накопленная деформация напрямую в НЭТ не входит, промоделировать эти критерии в ее рамках невозможно. В то же время в рамках НЭТ можно ввести некоторые их эффективные аналоги, которые по смыслу

выполняли бы подробную функцию:  $m_{\text{eff}} = d \log \varepsilon^e / d \log \dot{h}_b$  (рис. 2,а) и  $n_{\text{eff}} = d \log \varepsilon^e / d \log t$  (рис. 2,б). Здесь  $\varepsilon^e$  – упругая сдвиговая деформация, пропорциональная напряжению  $\sigma$ ;  $t$  – время, которое при постоянной скорости деформирования пропорционально накопленной деформации  $\varepsilon$ . Скорость же производства границ зерен  $\dot{h}_b$  полагается мерой, аналогичной скорости деформирования  $\dot{\varepsilon}$ , а зависимость от времени задается уравнениями (7) и (8).



**Рис. 2.** Эффективные коэффициенты: *a* – скоростной чувствительности напряжения течения  $m_{\text{eff}}$ , *б* – деформационного упрочнения  $n_{\text{eff}}$

Например, коэффициент  $m_{\text{eff}}$  на начальной стадии деформирования принимает отрицательные значения, увеличивается и в точке левее максимума кривой прочности (см. рис. 1,б) достигает нуля, а правее этого максимума принимает большое значение (см. рис. 2,а). Если считать, что смена упрочнения на разупрочнение происходит в результате потери устойчивости сверхпластического течения, то эффективный критерий удивительно точно отражает эту точку. Кроме того, перед самым разрывом он принимает также бесконечно большие значения. Причем если по смыслу принять, что вначале условия для сверхпластического течения наиболее благоприятные и это соответствует большим отрицательным значениям  $m_{\text{eff}}$ , то по мере приближения к максимуму прочности условия для такого течения ухудшаются (исчерпание ресурса). При достижении же максимума ресурс полностью исчерпывается, потом система реагирует большими значениями  $m_{\text{eff}}$ , после чего он снова переходит в отрицательную область, причем растет со временем по абсолютной величине. Эта стадия соответствует разрыву образца.

Аналогично ведет себя и эффективный коэффициент деформационного упрочнения  $n_{\text{eff}}$  (рис. 2,б). Он имеет отрицательные значения в основной области СПД и проходит через нуль в области максимального упрочнения (см. рис. 1,б). Далее он растет в области положительных значений, обращаясь в бесконечность перед разрывом.

#### 4. Истинные критерии сверхпластичности

В рамках НЭТ отсутствует связь параметров модели с накопленной деформацией. Поэтому приходится прибегнуть к эффективным коэффициентам скоростной чувствительности напряжения течения и деформационного упрочнения. Но в качестве такой связи можно использовать известные в сверхпластичности реологические соотношения типа (4) и (5), которые можно рассматривать как некоторый тип эволюционных уравнений. Тогда, переписывая соотношения (3)–(5) в терминах НЭТ, получим следующее «эволюционное» уравнение:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \gamma_\varepsilon \left[ A_b^* (\varepsilon_{ij}^e)^2 h_g^2 \phi_g + A_v^* (\varepsilon_{ij}^e)^n \right]. \quad (12)$$

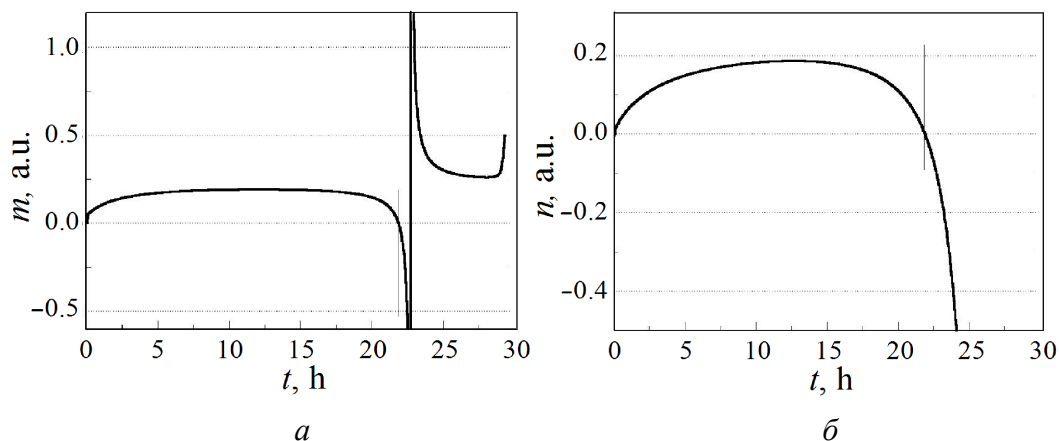
Здесь учтено, что ширина границы является, по сути, мерой ее энергии, поэтому вместо ширины границы в данной формуле фигурирует энергия. Новые константы перенормированы за счет внесения в них всех «лишних» постоянных в соотношениях (4), (5), не существенных для физики процесса. Они потом будут учтены при численных оценках. Кроме того, в первом слагаемом (12), отвечающем за зернограничную деформацию, отсутствует такая важная характеристика, как плотность граничных дислокаций, которая будет влиять на характеристики проскальзывания вдоль границ зерен. Учтем это в новой редакции в линейном приближении

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \gamma_\varepsilon \left[ A_b^* (\varepsilon_{ij}^e)^2 h_g^2 h_D \phi_g + A_v^* (\varepsilon_{ij}^e)^n \right], \quad (13)$$

где  $A_v^* = A_v D_v G \Omega / b^2 k_B T$ . Численно интегрируя уравнение (13), для которого все величины, входящие в него, определены в рамках НЭТ, можно легко рассчитать скорость деформации  $\dot{\varepsilon}$  и найти накопленную деформацию. Эти данные можно использовать для расчета истинных коэффициентов скоростной чувствительности напряжения пластического течения  $m$  и деформационного упрочнения  $n$  в соответствии с их определениями (10), (11). Графики временных зависимостей этих коэффициентов приведены на рис. 3, 4.

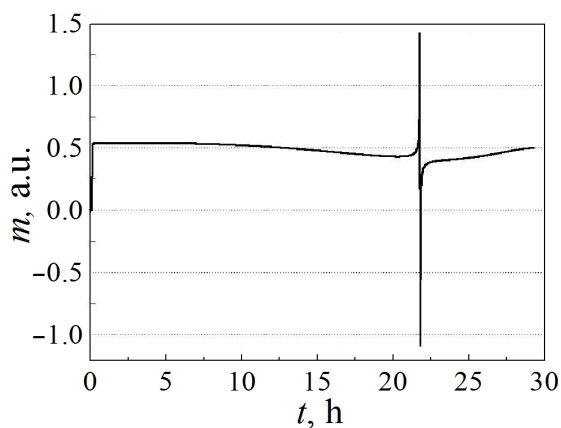
Из рис. 3,а видно, что для выбранных параметров коэффициент  $m$  не достигает значения 0.4, который считается необходимым для проявления сверхпластичности. Это может означать, что материал с данными параметрами таким свойством не обладает. Кроме того, особенностью этого графика является то, что в области максимума упрочнения (вертикальная линия) коэффициент  $m$  обращается в нуль, что может свидетельствовать лишь о том, что эта точка при данных параметрах физически не достижима. Кривые, представленные на рис. 3, а и б, внешне сходны, хотя по смыслу они разные, и такое совпадение имеет место не при всех параметрах.





**Рис. 3.** Эволюция коэффициентов скоростной чувствительности напряжения течения (*a*) и деформационного упрочнения (*б*). Вертикальная линия обозначает положение максимума кривой упрочнения–разупрочнения

Чтобы найти параметры, удовлетворяющие требованию сверхпластичности, вернемся к уравнению (13), которое связывает параметры НЭТ со скоростью накопления необратимых деформаций. Если положить, что  $A_v^* = 0$ , (т.е. пренебрежем деформацией по телу зерна, а оставим только деформацию по границам зерен), то график скоростной чувствительности напряжения течения практически во всей области, кроме зоны, прилежащей к максимуму кривой упрочнения–разупрочнения, близок к значению 0.5 (рис. 4).



**Рис. 4.** Эволюция коэффициента скоростной чувствительности напряжения течения для случая  $A_v^* = 0$

Таким образом, коэффициент скоростной чувствительности удовлетворяет критерию сверхпластичности тем в большей степени, чем выше вклад в необратимую деформацию проскальзывания по границам зерен. Каким образом определяется соотношение между этими механизмами, остается пока вне рамок данного рассмотрения, и для разрешения этого вопроса необходимо привлекать дополнительные соображения, включая в модель неоднородные эффекты и элементы обратной связи.

## 5. Заключение

Для описания сверхпластичности представлена система кинетических уравнений НЭТ, и с ее помощью получена кривая упрочнения–разупрочнения, форма которой хорошо соответствует экспериментальным кривым. При этом для сверхпластичных материалов плотность границ зерен уменьшается (средний размер зерна растет), а плотность зернограничных дислокаций увеличивается. Последнее обстоятельство сначала ведет к упрочнению за счет роста сопротивления их движению на лесе зернограничных дислокаций, а потом – к разупрочнению за счет локального «расплавления» по границам зерен.

В рамках полученной системы уравнений исследованы эффективные коэффициенты деформационного упрочнения и скоростной чувствительности к пластическому течению. Показано, что их особенности достаточно точно передают характерные черты сверхпластического течения в точке максимума кривой упрочнения–разупрочнения.

Включение реологических соотношений в систему уравнений НЭТ позволило связать накопленную деформацию и генерацию структурных дефектов. В свою очередь, это позволило вычислить истинные коэффициенты скоростной чувствительности и деформационного упрочнения. Показано, что не при всех параметрах модели (и материала) коэффициенты скоростной чувствительности удовлетворяют условию сверхпластического течения, а соответствующий материал не может быть деформирован сверхпластически. Условием попадания этого коэффициента в область сверхпластичности является наличие высокой доли вклада в общую деформацию проскальзывания по границам зерен.

1. *V. Paidar, S. Takeuchi*, J. Phys. III **1**, 957 (1991).
2. *А.И. Пшеничнюк, О.А. Кайбышев, В.В. Астанин*, ФТТ **39**, 2179 (1997).
3. *О.А. Кайбышев, А.И. Пшеничнюк*, Вестник УГАТУ **1**, 53 (2000).
4. *В.Н. Перевезенцев, Ю.В. Свирина*, ЖТФ **68**, № 12, 38 (1998).
5. *В.Н. Перевезенцев, Ю.В. Свирина, А.Ю. Угольников*, ЖТФ **72**, № 4, 11 (2002).
6. *А.В. Хоменко, Я.А. Ляшенко*, ЖТФ **75**, № 11, 17 (2005).
7. *L.S. Metlov, A.V. Khomenko, I.A. Lyashenko*, SMP **14**, 13001 (2011).
8. *Л.С. Метлов, М.М. Мышляев, А.В. Хоменко, Я.А. Ляшенко*, Письма в ЖТФ **38**, № 21, 28 (2012).
9. *Я.И. Рудаев, Д.А. Китаева*, Вестник СамГУ. Естественнонаучная серия **37**, № 3, 72 (2005).
10. *Д.А. Китаева, Я.И. Рудаев*, Математическое моделирование систем и процессов № 13, 115 (2005).
11. *Г.М. Аманбаева, Д.А. Китаева, Я.И. Рудаев*, Математическое моделирование систем и процессов № 14, 6 (2006).
12. *Д.А. Китаева, Ш.Т. Пазылов, Я.И. Рудаев*, Математическое моделирование систем и процессов № 15, 46 (2007).
13. *А.И. Олемской, А.В. Хоменко*, Успехи физики металлов **2**, 189 (2001).

14. *V.N. Perevezentsev, V.V. Rybin, V.N. Chuvil'deev*, Acta Met. Mater. **40**, 887 (1992).
15. *В.Н. Чувильдеев, О.Э. Пирожникова, А.В. Нохрин, М.М. Мышляев*, ФТТ **49**, 650 (2007).
16. *В.Н. Чувильдеев, А.В. Щавлева, А.В. Нохрин, О.Э. Пирожникова, М.Ю. Грязнов, Ю.Г. Лопатин, А.Н. Сысоев, Н.В. Мелехин, Н.В. Сахаров, В.И. Копылов, М.М. Мышляев*, ФТТ **52**, 1026 (2010).
17. *Л.С. Метлов*, Известия РАН. Серия физическая **72**, 1353 (2008).
18. *L.S. Metlov*, Phys. Rev. Lett. **106**, 165506 (2011).
19. *L.S. Metlov*, Phys. Rev. **E81**, 051121 (2010).
20. *L.S. Metlov*, Phys. Rev. **E90**, 022124 (2014).
21. *I.A. Lyashenko, A.V. Khomenko, L.S. Metlov*, Tribology International **44**, 476 (2011).
22. *Л.С. Метлов, М.М. Мышляев*, Доклады РАН **433**, 477 (2010).
23. *А.М. Глезер, Л.С. Метлов*, ФТТ **52**, 1090 (2010).
24. *Л.С. Метлов, М.М. Мышляев*, ФТВД **19**, № 4, 19 (2009).
25. *А.М. Глезер*, Известия РАН. Серия физическая **71**, 1767 (2007).
26. *В.В. Рыбин*, Большие пластические деформации и разрушение металлов, Металлургия, Москва (1986).
27. *Я.Е. Бейгельзимер, В.Н. Варюхин, Д.В. Орлов, С.Г. Сынков*, Винтовая экструзия – процесс накопления деформации, ТЕАН, Донецк (2003).
28. *Л.С. Метлов*, Вестник Донецкого университета. Сер. А: Естественные науки № 2, 144 (2009).

*L.S. Metlov, M.M. Myshlyayev, A.G. Petrenko*

## MODELING OF COEFFICIENTS OF THE RATE SENSIBILITY OF FLOW STRESS AND DEFORMATION STRENGTHENING

In the frameworks of phenomenological approach, the evolution of structural defects and the strengthening – softening curves of super-plastic materials during their deformation is described. Evolution of the coefficient of the rate sensibility of flow stress and the coefficient of deformation strengthening is studied in a simple and accurate variant.

**Keywords:** superplasticity, strengthening, softening, coefficient of rate sensibility of flow stress, deformation strengthening coefficient

**Fig. 1.** Evolution of a system under superplastic deformation:  $a$  – the density of grain boundaries (curve 1) and boundary dislocations (curve 2);  $\bar{\sigma}$  – strengthening ( $\varepsilon_{ij}^e$  – intensity of elastic shear strains). The material is strengthened up to the maximum; after the maximum, it is softened

**Fig. 2.** Effective coefficients:  $a$  – rate sensibility of flow stress  $m_{\text{eff}}$ ,  $\bar{\sigma}$  – deformation strengthening  $n_{\text{eff}}$

**Fig. 3.** Evolution of the coefficients of the rate sensibility of flow stress ( $a$ ) and deformation strengthening ( $\bar{\sigma}$ ). The vertical line marks the position of the maximum of the strengthening-softening curve

**Fig. 4.** Evolution of the coefficient of the rate sensibility of flow stress in the case of  $A_v^* = 0$