

УДК 536-12
DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-3-1051-1054

О САМООРГАНИЗАЦИИ В ПРОЦЕССАХ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

© Д.А. Китаева¹⁾, Г.Е. Коджаспиров¹⁾, Я.И. Рудаев²⁾

¹⁾ Санкт-Петербургский политехнический университет им. Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: dkitaeva@mail.ru, gkodzhaspirov@yandex.ru

²⁾ Кыргызско-Российский Славянский университет, г. Бишкек, Кыргызстан,
e-mail: rudaev36@mail.ru

Динамическая сверхпластичность алюминиевых сплавов рассматривается с позиций теории неравновесных фазовых переходов. Макрокинетический анализ механизмов сверхпластической деформации осуществлен на основании модели, представляющей связь между напряжениями, температурой и кинематическими характеристиками, причем энергетическую функцию состояния предложено рассматривать в форме потенциала катастрофы сборки. В рамках разработанных определяющих соотношений с привлечением термодинамических функций отклика проанализирована эволюция открытой неравновесной системы, моделирующей процесс температурно-скоростной деформации материалов. Показано соответствие пика сверхпластичности, которому отвечает формирование упорядоченной равноосной мелкозернистой структуры, максимуму удельной теплоемкости.

Ключевые слова: самоорганизация; макрокинетика; динамическая сверхпластичность; теплоемкость; алюминиевые сплавы.

При динамической сверхпластичности [1] формирование мелкозернистой равноосной структуры, необходимой для реализации механизма зернограничного проскальзывания, происходит в процессе нагрева и деформации. Иными словами, эффект динамической сверхпластичности связан с резкими структурными изменениями необратимого характера [2]. В частности, в промышленных алюминиевых сплавах зеренная структура эволюционирует и в результате фрагментации с образованием большеугловых границ разориентации и (или) динамической рекристаллизации становится мелкозернистой [3–4]. Отмеченный факт был использован при формулировке модели [1; 5; 6], которая описывает поведение алюминиевых сплавов с позиций механики деформируемого тела не только при сверхпластичности, но и в пограничных областях термopластичности и высокотемпературной ползучести.

Оценим модель [1; 6] с точки зрения определения представляющих реальный интерес физических величин и получения дополнительной информации. Очевидно, что динамической сверхпластичности сопутствуют структурные изменения «размытого» типа [2], и поэтому целесообразно проследить за поведением функций отклика, которые сравнительно легко определяются при известном аналитическом выражении плотности термодинамического потенциала. К указанным функциям можно, прежде всего, отнести удельную теплоемкость.

К сожалению, прямые данные об изменении теплоемкости в зависимости от термодинамических переменных отсутствуют. Это, по-видимому, связано с техническими трудностями проведения прецизионных теплофизических измерений в механических экспериментах. Исключение составляют опыты [7], в которых на сплаве Zn-22%Al показано соответствие оптималь-

ной температуры сверхпластичности максимуму удельной теплоемкости, а следовательно, и наличию структурного (в данном случае эвтектоидного) превращения. Непрерывность функции удельной теплоемкости объясняет связь сверхпластичности с теорией размытых фазовых переходов.

Удельная теплоемкость определяется [8] по известной формуле

$$C = -\theta \left(\frac{\partial^2 F}{\partial \theta^2} \right), \quad (1)$$

где F – свободная энергия; θ – абсолютная температура.

Переход к энергетической функции состояния представляется [8] в виде

$$\Phi = \frac{F}{k\theta}, \quad (2)$$

где k – постоянная Больцмана.

При формулировке модели энергетическая функция состояния была принята в форме потенциала катастрофы сборки [9] с учетом влияния внешнего поля

$$\Phi(\eta, \beta, q) = \frac{1}{4} m_0 \eta^4 + \frac{1}{2} \beta (\xi) \eta^2 - q \eta. \quad (3)$$

Здесь $q = \frac{\sigma}{\sigma^*} - 1$; $\eta = \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}^*} - 1$; σ – действительное напряжение; $\dot{\epsilon}$ – скорость деформации; σ^* , $\dot{\epsilon}^*$ – внутренние альтернативные параметры состояния;

$\beta = \beta(\xi)$ – управляющий параметр; $\xi = \frac{\theta - \theta_c^m}{\theta_c^v - \theta_c^m}$ – нормированная температура; θ – абсолютная температура; θ_c^m, θ_c^v – нижняя и верхняя границы термического диапазона сверхпластичности; m_0 – постоянная материала.

Показано [1; 6], что функция (1) пригодна для описания закономерностей высокотемпературной деформации в широком скоростном диапазоне, включая интервалы сверхпластичности, промышленных алюминиевых сплавов.

В соответствии с [1; 6; 9] при $\beta > 0$ ($\xi \notin]0, 1[$) изменений структурного характера в деформируемом материале не происходит. Условие $\beta < 0$ ($\xi \in]0, 1[$) отвечает структурно неустойчивому состоянию среды. Если $\beta = 0$, то имеют место переходные процессы.

Остановимся на определении приращения удельной теплоемкости ΔC в термическом интервале сверхпластичности ($\xi \in]0, 1[$), для которого получено [10]

$$\frac{\Delta C(\xi)}{k} = a_0(\xi) + a_1(\xi)\eta + a_2(\xi)\eta^2 + a_3(\xi)\eta^3 + a_4(\xi)\eta^4. \quad (4)$$

Конкретными расчетами показано [11], что слагаемые $a_0(\xi)$, $a_3(\xi)\eta^3$, $a_4(\xi)\eta^4$ можно принять несущественными, практически не влияющими на величину удельной теплоемкости и, следовательно, будем иметь [12]

$$\frac{\Delta C(\xi)}{k} = a_1(\xi)\eta + a_2(\xi)\eta^2, \quad (5)$$

причем

$$\begin{aligned} a_1(\xi) = & -2(\xi + \nu) \frac{d \ln \sigma^*}{d\xi} + (\xi + \nu)^2 \left[\beta \frac{d\beta}{d\xi} \frac{d \ln \sigma^*}{d\xi} + \right. \\ & \left. + 2\beta^2 \left(\frac{d \ln \sigma^*}{d\xi} \right)^2 + \beta \left(\frac{d \ln \sigma^*}{d\xi} \right)^2 - \frac{d^2 \ln \sigma^*}{d\xi^2} \right]; \\ a_2(\xi) = & -(\xi + \nu) \left[\frac{d\beta}{d\xi} + 2\beta \frac{d \ln \sigma^*}{d\xi} \right] - (\xi + \nu)^2 \left[-\beta \frac{d\beta}{d\xi} \frac{d \ln \sigma^*}{d\xi} + \right. \\ & \left. + \frac{1}{2} \frac{d^2 \beta}{d\xi^2} - 2\beta^2 \left(\frac{d \ln \sigma^*}{d\xi} \right)^2 + \frac{d\beta}{d\xi} \frac{d \ln \sigma^*}{d\xi} + \beta \frac{d^2 \ln \sigma^*}{d\xi^2} \right]; \quad (6) \end{aligned}$$

$\nu = \theta_c^m / \Delta\theta_c$, где $\Delta\theta = \theta_c^v - \theta_c^m$ – температурный диапазон сверхпластичности.

На рис. 1 представлены графики изменения приращения удельной теплоемкости в зависимости от приведенной температуры для деформированного сплава АМг5. Причем сплошная линия относится к точному решению (4). Материальные функции и константы заимствованы в [1].

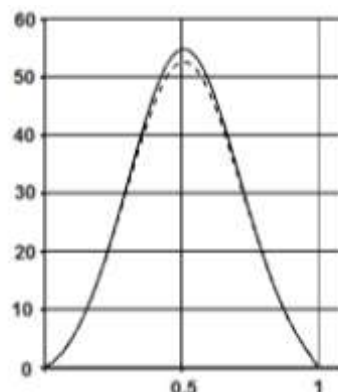


Рис. 1. Функция приращения удельной теплоемкости в температурном интервале сверхпластичности при растяжении сплава АМг5

Из графиков видно, что приращение удельной теплоемкости переходит через максимум в середине температурного интервала сверхпластичности. Следовательно, полученный результат не противоречит данным эксперимента, изложенным в [6].

В заключение отметим следующее. При формулировке модели [1; 5] было принято, что сверхпластичность считается особым (структурно неустойчивым) состоянием деформируемого материала в иерархической смене состояний. Указанное состояние трактуется как эффект, осуществляемый в условиях необратимого структурного превращения. Анализ удельной теплоемкости [13], приращение которой в режимах сверхпластичности носит пикообразный характер, подтверждает последнее. Ему же отвечает образование упорядоченной равноосной мелкозернистой структуры [1; 3], позволяющей прогнозировать возникновение структурной ситуации, способствующей осуществлению механизма зернограницного проскальзывания. Иными словами, путем самоорганизации в условиях, далеких от термодинамического равновесия, реализуется процесс оптимального структурообразования [14].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рудаев Я.И. Введение в механику динамической сверхпластичности. Бишкек: Изд-во КРСУ, 2003. 134 с.
2. Рудаев Я.И. О фазовых переходах в сверхпластичности // Проблемы прочности. 1990. № 10. С. 50-54.
3. Вайнблат Ю.М., Шаршагин Н.А. Динамическая рекристаллизация алюминиевых сплавов // Цветные металлы. 1984. № 2. С. 67-70.
4. Коджастиров Г.Е., Рудской А.И., Рыбин В.В. Физические основы и ресурсосберегающие технологии изготовления изделий пластическим деформированием. СПб.: Наука, 2007. 350 с.
5. Китаева Д.А., Пазылов Ш.Т., Рудаев Я.И. О приложениях методов нелинейной динамики в механике материалов // Вестник ПГТУ. Математическое моделирование систем и процессов. 2007. № 15. С. 46-70.
6. Рудаев Я.И., Китаева Д.А. О кинетических уравнениях модели динамической сверхпластичности // Вестник Самарского государственного университета. 2005. Т. 37. № 3. С. 72-78.
7. Кувшинов Г.А., Новиков И.И. Об оптимальной температуре сверхпластичности // Теплофизика конденсированных сред. М.: Наука, 1985. С. 41-43.
8. Хакен Г. Синергетика: иерархия неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах. М.: Мир, 1985. 423 с.
9. Гилмор Р. Прикладная теория катастроф. Ч. 1. М.: Мир, 1984. 285 с.

10. Китаева Д.А., Рудаев Я.И. О макрокинетике динамической сверхпластичности алюминевых сплавов // Вестник ПГТУ. Математическое моделирование систем и процессов. 2005. № 13. С. 115-122.
11. Kitaeva D.A., Rudaev Ya.I. Macrokinetics heirarhies of states at dynamic superplasticity // Materials Science Forum. 2008. V. 575-578. P. 340-344.
12. Аманбаева Г.М., Китаева Д.А., Рудаев Я.И. Термокинетический анализ параметров динамической сверхпластичности // Вестник ПГТУ. Математическое моделирование систем и процессов. 2006. № 14. С. 6-10.
13. Китаева Д.А., Рудаев Я.И. О макрокинетической концепции динамической сверхпластичности // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. 2014. № 32. С. 74-78.
14. Пригожин И. От существующего к возникающему. М.: Едиториал УРСС, 2002. 288 с.

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 15-08-06531 а).

Поступила в редакцию 10 апреля 2016 г.

UDC 536-12

DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-3-1051-1054

ON SELF-ORGANIZATION UNDER THERMOMECHANICAL DEFORMATION PROCESSES

© D.A. Kitaeva¹⁾, G.E. Kodzhaspirov¹⁾, Y.I. Rudaev²⁾

¹⁾ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russian Federation,
e-mail: dkitaeva@mail.ru, gkodzhaspirov@yandex.ru

²⁾ Kyrgyz-Russian Slavic University, Bishkek, Kyrgyzstan, e-mail: rudaev36@mail.ru

The dynamic superplasticity of aluminium alloys is considered from the positions of nonequilibrium phase transition theory. The macrokinetic analysis of superplastic deformation mechanisms is carried out on the basis of the model representing stress, temperature and kinematic characteristics relationship, and energy state function is considered in the form of catastrophe assembling potential type. Evolution of the open nonequilibrium system modelling the process of temperature-strain rate deformation of the materials is analysed within the proposed defining ratios with attraction of the thermodynamic response functions. Compliance of the superplasticity peak corresponding to formation of the ordered equiaxial fine-grained structure, to the maximum of specific heat is shown.

Key words: self-organization; macrokinetics; dynamic superplasticity; heat capacity; aluminum alloys.

REFERENCES

1. Rudaev Ya.I. *Vvedenie v mekhaniku dinamicheskoy sverkhplastichnosti*. Bishkek, Kyrgyz Russian Slavic University Publ., 2003. 134 p.
2. Rudaev Ya.I. O fazovykh perekhodakh v sverkhplastichnosti. *Problemy prochnosti – Strength of Materials*, 1990, no. 10, pp. 50-54.
3. Vaynblat Yu.M., Sharshagin N.A. Dinamicheskaya rekristallizatsiya alyuminievykh spлавov. *Tsvetnye metally – Non-ferrous Metals*, 1984, no. 2, pp. 67-70.
4. Kodzhaspirov G.E., Rudskoy A.I., Rybin V.V. *Fizicheskie osnovy i resursoberegayushchie tekhnologii izgotovleniya izdeliy plasticheskim deformirovaniem*. St. Petersburg, Nauka Publ., 2007. 350 p.
5. Kitaeva D.A., Pazylov Sh.T., Rudaev Ya.I. O prilozheniyakh metodov nelineynoy dinamiki v mekhanike materialov. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Matematicheskoe modelirovanie sistem i protsessov – Perm National Research Polytechnic University*, 2007, no 15, pp. 46-70.
6. Rudaev Ya.I., Kitaeva D.A. O kineticheskikh uravneniyakh modeli dinamicheskoy sverkhplastichnosti. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo universiteta – Vestnik of Samara State University*, 2005, vol. 37, no. 3, pp. 72-78.
7. Kuvshinov G.A., Novikov I.I. Ob optimal'noy temperature sverkhplastichnosti. *Teplofizika kondensirovannykh sred*. Moscow, Nauka Publ., 1985, pp. 41-43.
8. Khaken G. *Sinergetika: ierarkhiya neustoychivostey v samoorganizuyushchikhsya sistemakh i ustroystvakh*. Moscow, Mir Publ., 1985. 423 p.
9. Gilmore R. *Prikladnaya teoriya katastrof*. Ch. 1. Moscow, Mir Publ., 1984. 285 p.
10. Kitaeva D.A., Rudaev Ya.I. O makrokinetike dinamicheskoy sverkhplastichnosti alyuminievykh spлавov. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Matematicheskoe modelirovanie sistem i protsessov – Perm National Research Polytechnic University*, 2005, no. 13, pp. 115-122.
11. Kitaeva D.A., Rudaev Ya.I. Macrokinetics heirarhies of states at dynamic superplasticity. *Materials Science Forum*, 2008, vol. 575-578, pp. 340-344.
12. Amanbaeva G.M., Kitaeva D.A., Rudaev Ya.I. Termokineticheskiy analiz parametrov dinamicheskoy sverkhplastichnosti. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Matematicheskoe modelirovanie sistem i protsessov – Perm National Research Polytechnic University*, 2006, no. 14, pp. 6-10.
13. Kitaeva D.A., Rudaev Ya.I. O makrokineticheskoy kontseptsii dinamicheskoy sverkhplastichnosti. *Izvestiya Kyrgyzskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. I. Razzakova*, 2014, no. 32, pp. 74-78.

14. Prigozhin I. *Ot sushchestvuyushchego k voznikayushchemu*. Moscow, Editorial URSS Publ., 2002. 288 p.

GRATITUDE: The work is fulfilled under financial support of Russian Fund of Fundamental Research (grant no. 15-08-06531 a).

Received 10 April 2016

Китаева Дарья Анатольевна, Санкт-Петербургский политехнический университет им. Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры сопротивления материалов, e-mail: dkitaeva@mail.ru

Kitaeva Darya Anatolevna, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russian Federation, Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Associate Professor of Strength of Materials Department, e-mail: dkitaeva@mail.ru

Коджаспиров Георгий Ефимович, Санкт-Петербургский политехнический университет им. Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, доктор технических наук, профессор, директор Центра новых материалов, e-mail: gkodzhaspirov@yandex.ru

Kodzhaspirov Georgiy Efimovich, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russian Federation, Doctor of Technics, Professor, Director of Materials Science and Processing Centre, e-mail: gkodzhaspirov@yandex.ru

Рудаев Яков Исаакович, Кыргызско-Российский Славянский университет, г. Бишкек, Кыргызстан, доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой механики, e-mail: rudaev36@mail.ru

Rudaev Yakov Isaakovich, Kyrgyz-Russian Slavic University, Bishkek, Kyrgyzstan, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Head of Mechanics Department, e-mail: rudaev36@mail.ru