

УДК 539.3

DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-3-1216-1218

## ОБ ОЦЕНКЕ ПАРАМЕТРА АНИЗОТРОПНОСТИ

© Ш.Т. Пазылов

Кыргызско-Российский Славянский университет им. Б.Н. Ельцина, г. Бишкек, Кыргызстан,  
e-mail: pazylov56sh@mail.ru

В рамках модельного представления особенностей деформирования алюминиевых сплавов и закономерностей изменения деформационной анизотропности рассматривается задача описания параметра анизотропности и оценка согласованности его поведения с кинетикой коэффициента диффузии, который отражает структурные превращения при температурно-скоростных условиях деформирования материалов.

*Ключевые слова:* анизотропность; скорость деформирования; параметр анизотропности; сверхпластичность; коэффициент диффузии; структурные превращения.

Особенности деформационного поведения при наличии деформационной анизотропности исходно текстурированного материала и сильная зависимость показателя анизотропности  $\psi$  от термомеханических режимов деформирования, а также взаимосвязь закономерностей изменения его с эффектом сверхпластичности алюминиевого сплава 1561 установлена в [1–3].

Изученная кинетика структурообразования из исходно текстурированного состояния при температурно-скоростном воздействии в режимах, включающих интервалы сверхпластичности, хорошо коррелируется с закономерностями изменения деформационной анизотропности сплава 1561, а минимизация этого показателя при сверхпластичности объясняется формированием в материале мелких равноосных зерен [3–7]. Поэтому в [1–3; 6; 7] справедливо и обоснованно предлагается рассматривать его в качестве макромеханического параметра материала, учитывающего эволюцию структурных изменений, происходящих в процессе термического воздействия.

Очевидно, что для принятия указанного представления необходимо сформулировать модельное соотношение, описывающее кинетику параметра анизотропности, и установить его взаимосвязь с некоторой физической величиной, отражающей физическую суть структурного превращения материала.

Температурную эволюцию параметра анизотропности проследим с привлечением одномерного уравнения Фоккера–Планка [8], относящегося к классу параболических уравнений и описывающего монотонную необратимую эволюцию любого начального распределения плотности вероятности к равновесному состоянию. Заметим, что уравнение Фоккера–Планка моделирует суперпозицию процессов трения и диффузии. Для получения замкнутого решения этого уравнения в форме гауссового распределения принимаем коэффициент дрейфа линейно зависящим от параметра порядка [9]. Имеем

$$\psi(\eta, \xi) = (\pi a)^{1/2} \exp \left[ -\frac{(\eta - b)^2}{a} \right]. \quad (1)$$

Здесь  $\eta$  – параметр порядка;  $\xi$  – приведенная температура.

$$\begin{aligned} a(\xi) &= \frac{Q}{c} [1 - \exp(-2c\xi)] + a_0 \exp(-2c\xi) \\ b(\xi) &= b_0 \exp(-c\xi), \end{aligned} \quad (2)$$

причем материальные функции  $Q(\eta)$ ,  $c(\eta)$ ,  $a_0(\eta)$ ,  $b_0(\eta)$  определяются из следующих граничных условий

$$\begin{aligned} \frac{d\psi}{d\xi} \Big|_{\xi=\xi^*} &= 0; \quad \frac{d\psi}{d\xi} \Big|_{\xi=\frac{1}{2}} = 0; \\ \frac{d^2\psi}{d\xi^2} \Big|_{\xi=0} &= 0; \quad \psi \Big|_{\xi=\frac{1}{2}} = 1. \end{aligned} \quad (3)$$

Зависимостями (3) подчеркивается, что при температуре  $\xi = \xi^*$  (или 693 K) на изотермах  $\psi \sim \xi$  существует математический максимум. Аналогичная ситуация имеет место и в середине термического диапазона сверхпластичности ( $\xi = 1/2$ ). Третьему условию (3) отвечает температура перехода в сверхпластический диапазон ( $\xi = 0$ ). Последним равенством (3) предполагается, что в середине термического интервала сверхпластичности материал становится изотропным.

Особенности установленных материальных функций заключается в том, что они не имеют прямого физического толкования. Исключение составляет функция  $Q = Q(\eta)$ , являющаяся коэффициентом диффузии. Поэтому представляется целесообразным проследить за его изменчивостью в зависимости от температурно-скоростных условий деформирования.

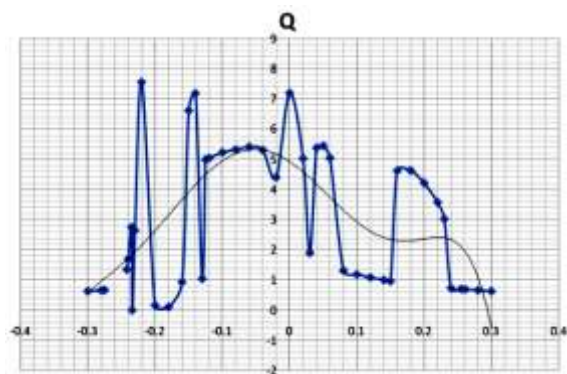


Рис. 1. Зависимость коэффициента диффузии  $Q$  от параметра порядка

В рамках динамической модели [10–13] параметр порядка рассматривается как коллективная мода температуры и скорости деформации. Поэтому с привлечением уравнения состояния, сформулированного в [10–12], реализована численная процедура определения материальных функций для начально анизотропного алюминиевого сплава 1561, особенности деформационного поведения которого при высоких гомологических температурах обсуждено в [1; 14].

На рис. 1 приведены результаты расчета, оценивающие поведение функции  $Q = Q(\eta)$  и ее полиномиальная аппроксимация.

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Введенное предположение о линейности коэффициента дрейфа предопределяет переформатирование ответственности за деформационные процессы на диффузионную составляющую уравнения Фоккера–Планка. Линейность коэффициента дрейфа, который предназначен для описания механизмов зернограницного скольжения, может рассматриваться как первое приближение, необходимое для получения замкнутого решения уравнения Фоккера–Планка. В действительности указанный коэффициент существенно нелинеен, поскольку в процессе температурно-скоростного деформирования происходит перераспределение форм массопереноса. Последнее означает, что изменчивость температуры в определенных скоростных условиях способствует иерархии структурных состояний, обусловленных при сверхпластичности динамической рекристаллизацией. Здесь формируется мелкозернистая структура (1–10 мкм), сопровождаемая механизмом зернограницного проскальзывания со сменой соседей зерен.

Линейность коэффициента дрейфа позволяет допустить, что коэффициент диффузии не зависит от скорости возрастания температуры. Поэтому нелинейный характер зависимости  $Q \sim \eta$  вполне предсказуем и может быть объяснен нелинейным влиянием параметра порядка. Сказанное вполне отвечает модельным представлениям [5; 9], описывающим не только сверхпластичность, но и пограничные области термопластичности и высокотемпературной ползучести.

Максимизацию коэффициента диффузии вблизи нулевого значения параметра порядка объясняет интенсификация механизмов проскальзывания по границам зерен и, как следствие, отвечает режимам сверхпластичности. Подобный механизм облегчается аморфизацией границ зерен.

В заключение отметим, что коэффициент диффузии может рассматриваться как функция, ответственная за перестройку механизмов деформации в меняющихся температурно-скоростных условиях.

Последнее хорошо коррелирует с представлением о сверхпластичности как об эффекте, развивающемся в процессе размытого необратимого структурного превращения — динамической рекристаллизации. Учитывая многостадийность перехода (до и после сверхпластичности имеют место метастабильные состояния), можно, по крайней мере, качественно оценить роль диффузионной составляющей процесса деформации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пазылов Ш.Т., Оморов Н.А., Рудаев Я.И. О деформационной анизотропии алюминиевых сплавов // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. Тамбов, 2010. Т. 15. Вып. 3. С. 974–975.
2. Пазылов Ш.Т., Оморов Н.А., Рудаев Я.И. Деформационная анизотропия и сверхпластичность алюминиевых сплавов // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. 2010. Т. 10. № 10. С. 144–149.
3. Китаева Д.А., Пазылов Ш.Т., Рудаев Я.И. О температурно-скоростном деформировании алюминиевых сплавов // ПМТФ. 2016. Т. 57. № 2. С. 1–8.
4. 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.
5. Kitaeva D.A., Rudaev Ya.I. Macrokinetics heirarhies of states at dynamic superplasticity // Materials Science Forum. 2008. V. 575–578. P. 340–344.
6. Арзыматов А.К., Оморов Н.А., Пазылов Ш.Т. Структурирования алюминиевого сплава 1561 в режимах сверхпластичности // Сборник научных трудов ИГ им. М.А. Лаврентьева СО РАН РФ. Новосибирск, 2012. С. 12–14.
7. Арзыматов А.К., Оморов Н.А., Пазылов Ш.Т. Формирование структуры алюминиевого сплава 1561 в режимах сверхпластичности // Микроорганизмы пластичности, разрушения и сопутствующих явлений: сборник материалов 6 Всерос. молодежной науч. конф. Тольятти, 2011. С. 157–159.
8. Балеску Р. Равновесная и неравновесная статистическая механика. М.: Мир, 1978. Т. 2. 399 с.
9. Хаген Г. Информатизация и самоорганизация: макроскопический подход к сложным системам. М.: УРСС: ЛЕНАНД, 2014. 320 с.
10. 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.
11. Рудской А.И., Рудаев Я.И. Механика динамической сверхпластичности алюминиевых сплавов. СПб.: Наука, 2009. 218 с.
12. Китаева Д.А., Рудаев Я.И. Синергетические представления в механике динамической сверхпластичности // НТВ СПбГУ. 2013. № 4–1 (183). С. 274–283.
13. Китаева Д.А., Рудаев Я.И. О чувствительности к структурным превращениям при деформации алюминиевых сплавов // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. 2014. Т. 14. № 7. С. 60–63.
14. Барахтина Н.Н., Золоторевский Ю.С., Рудаев Я.И. и др. Исследование оптимальных температурно-скоростных параметров горячей прокатки листов из алюминиевого сплава АМг61 (1561) // Вопросы материаловедения. 1992. Вып. 19–20. С. 72–79.

Поступила в редакцию 10 апреля 2016 г.

UDC 539.3

DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-3-1216-1218

## ON THE ANISOTROPISM PARAMETER ANALYSIS

© S.T. Pazylov

Kyrgyz-Russian Slavic University named after B.N. Yeltsin, Bishkek, Kyrgyzstan,  
e-mail: pazylov56sh@mail.ru

The task of the anisotropism parameter description within model representation of features of aluminum alloys deformation of and regularities of change of deformation anisotropism is considered. The analysis of coherence it behavior with diffusion coefficient kinetics which reflects structural transformations under temperature and high-rate conditions of deformation of materials is carried out.

**Key words:** anisotropism; deformation rate; anisotropism parameter; superplasticity; diffusion coefficient; structural transformations.

## REFERENCES

1. Pazylov Sh.T., Omorov N.A., Rudaev Ya.I. O deformatsionnoy anizotropii alyuminievykh splavov. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya Estestvennye i tekhnicheskie nauki – Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences*. Tambov, 2010, vol. 15, no. 3, pp. 974-975.
2. Pazylov Sh.T., Omorov N.A., Rudaev Ya.I. Deformatsionnaya anizotropiya i sverkhplastichnost' alyuminievykh splavov. *Vestnik Kyrgyzsko-Rossiyskogo Slavyanskogo universiteta*, 2010, vol. 10, no. 10, pp. 144-149.
3. Kitaeva D.A., Pazylov Sh.T., Rudaev Ya.I. O temperaturno-skorostnom deformirovani alyuminievykh splavov. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika – Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2016, vol. 57, no. 2, pp. 1-8.
4. 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.
5. Kitaeva D.A., Rudaev Ya.I. Makrokineticheskie heirarhies of states at dynamic superplasticity. *Materials Science Forum*, 2008, vol. 575-578, pp. 340-344.
6. Arzimatov A.K., Omorov N.A., Pazylov Sh.T. Strukturirovaniya alyuminievogo splava 1561 v rezhimakh sverkhplastichnosti. *Sbornik nauchnykh trudov IG im. M.A. Lavrent'eva SO RAN RF*. Novosibirsk, 2012, pp. 12-14.
7. Arzimatov A.K., Omorov N.A., Pazylov Sh.T. Formirovanie struktury alyuminievogo splava 1561 v rezhimakh sverkhplastichnosti. *Sbornik materialov VI Vserossiyskoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii "Mikroorganizmy plastichnosti, razrusheniya i soputstvuyushchikh yavleniy"*. Tolyatti, 2011, pp. 157-159.
8. Balesku R. *Ravnovesnaya i neravnovesnaya statisticheskaya mekhanika*. Moscow, Mir Publ., 1978, vol. 2. 399 p.
9. Khaken G. *Informatizatsiya i samoorganizatsiya: makroskopicheskiy podkhod k slozhnym sistemam*. Moscow, URSS, LENAND, 2014. 320 p.
10. 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.
11. Rudskoy A.I., Rudaev Ya.I. *Mekhanika dinamicheskoy sverkhplastichnosti alyuminievykh splavov*. St. Petersburg, Nauka Publ., 2009. 218 p.
12. Kitaeva D.A., Rudaev Ya.I. Sinergeticheskie predstavleniya v mekhanike dinamicheskoy sverkhplastichnosti. *NTV SPbGPU*, 2013, no. 4-1 (183), pp. 274-283.
13. Kitaeva D.A., Rudaev Ya.I. O chuvstvitel'nosti k strukturnym prevrashcheniyam pri deformatsii alyuminievykh splavov. *Vestnik Kyrgyzsko-Rossiyskogo Slavyanskogo universiteta*, 2014, vol. 14, no. 7, pp. 60-63.
14. Barakhtina N.N., Zolotarevskiy Yu.S., Rudaev Ya.I. i dr. Issledovanie optimal'nykh temperaturno-skorostnykh parametrov goryachey prokatki listov iz alyuminievogo splava AMg61 (1561). *Voprosy materialovedeniya*, 1992, no. 19-20, pp. 72-79.

Received 10 April 2016

Пазылов Шакир Тургунбаевич, Кыргызско-Российский Славянский университет им. Б.Н. Ельцина, г. Бишкек, Кыргызстан, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры механики, e-mail: pazylov56sh@mail.ru

Pazylov Shakir Turgunbaevich, Kyrgyz-Russian Slavic University named after B.N. Yeltsin, Bishkek, Kyrgyzstan, Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor of Mechanics Department, e-mail: pazylov56sh@mail.ru