

# ЗЕРНОГРАНИЧНОЕ ВНУТРЕННЕЕ ТРЕНИЕ В ПОРИСТОМ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОМ МАТЕРИАЛЕ

*В.Г. Кульков, В.В. Кулькова*

Филиал НИУ «МЭИ» в г. Волжском  
404110 г. Волжский, Волгоградская обл., пр. Ленина, д. 69  
Тел.: (8443) 210160, факс: (8443) 210166, e-mail: vfmei@vfmei.ru

Заключение совета рецензентов: 03.09.15    Заключение совета экспертов: 06.09.15    Принято к публикации: 09.09.15

Работа посвящена теоретическим исследованиям структуры материалов с субмикроразмерным размером зерна. Предлагается математическая модель внутреннего трения в пористом ультрамелкозернистом материале. Рассматривается диффузионное измерение форм зернограничных пор. Получены выражения для скорости межзеренного проскальзывания, внутреннего трения в форме дебаевского пика и времени релаксации.

Ключевые слова: внутреннее трение, пористый материал, наноструктурные материалы, зернограничное проскальзывание.

## THE GRAIN BOUNDARY INTERNAL FRICTION IN A POROUS ULTRA-FINE GRAINED MATERIAL

*V.G. Kul'kov, V.V. Kul'kova*

Volzhsky Branch of the National Research University «Moscow Power Engineering Institute»  
69 Lenin str., Volzhsky, Volgograd reg., 404110, Russia  
Tel.: (8443) 210160, fax: (8443) 210166, e-mail: vfmei@vfmei.ru

Referred: 03.09.15    Expertise: 06.09.15    Accepted: 09.09.15

This work is devoted to theoretical research of structure materials with submicro size of grain. The mathematical model of internal friction in a porous ultra-fine grained material is suggesting. On this article is considering reshaping the pores by means of the diffusion. There are derived expressions for the speed of intergranular slip, the internal friction in the form of the Debye peak and the relaxation time in this work.

Keywords: internal friction, porous material, nanostructured materials, grain boundary sliding.



*Виктор Геннадьевич  
Кульков  
Victor G. Kul'kov*

**Сведения об авторе:** д-р физ.-мат. наук, доцент, зав. кафедрой «Общая физика» ВФ МЭИ. Научно-педагогический стаж работы 26 лет.

**Образование:** Воронежский политехнический институт (1985).

**Область научных интересов:** миграция границ зерен, внутреннее трение, несоизмерные и фасетированные границы зерен, зернограничное проскальзывание.

**Публикации:** 165.

**Information about author:** full Ph.D. of physic-mathematical sciences, prof. Head of a Department of General physics, Volzhsky Branch of Moscow Power Engineering Institute. The scientific and pedagogical experience is 26 years.

**Education:** Voronezh Polytechnic Institute (1985).

**Research area:** migration of grain boundaries, internal friction, disproportionate and faceting grain boundaries, grain boundary sliding.

**Publications:** 165.





Валентина Викторовна  
Кулькова  
Valentina V. Kul'kova

**Сведения об авторе:** канд. физ.-мат наук, доцент кафедры «Общая физика» ВФ МЭИ. Научно-педагогический стаж работы 7 лет.

**Образование:** МЭИ (технический университет) (2008).

**Область научных интересов:** наноструктурные материалы, внутреннее трение, зернограничное проскальзывание.

**Публикации:** 21.

**Information about author:** Ph.D. of physic-mathematical sciences, associate professor at the department of General Physics of Volzhsky Branch of Moscow Power Engineering Institute. The scientific and pedagogical experience is 7 years.

**Education:** Volzhsky Branch of Moscow Power Engineering Institute (2008).

**Research area:** nanostructured materials, internal friction, grain boundary sliding.

**Publications:** 21.

## Введение

Нанокристаллические и ультрамелкозернистые материалы, находящие широкое применение в современных технологиях, представляют существенный интерес для теоретических и экспериментальных исследований как материалы, обладающие рядом необычных, порой даже уникальных свойств. К таким свойствам можно отнести высокую прочность, пластичность и демпфирующую способность, а также целый ряд магнитных и оптических характеристик. Обусловлено это не столько отличием в химическом составе материалов, сколько их структурой. Известно [1, 2], что уменьшение размера зерен до наномасштабного уровня приводит к качественному изменению дефектной структуры материалов. В их зернах могут отсутствовать источники дислокаций, а уже существующие дефекты под действием сил изображения вытесняются на границы. Таким образом, для наноразмерных и ультрамелкозернистых материалов характерны более совершенная структура зерен, увеличенная протяженность межзеренных границ, повышенная их неравномерность и т.д. Таким образом, существенное влияние на макроскопические физико-механические свойства нано- и ультрамелкозернистых материалов оказывают границы зерен и их стыки.

Одной из характеристик неравномерности границ является количество пор, наличие которых напрямую связано с технологией производства таких материалов. Наиболее часто поры располагаются в тройных стыках и на границах зерен [3-5], а также оказывают значительное влияние на свойства материала. Известно, что увеличение остаточной пористости приводит к понижению коррозионной стойкости, теплопроводности и параметров долговечности материала, а также к изменению его пластичности. С другой стороны, повышенная пористость является причиной увеличения каталитической активности, облегчает сверхпластическую деформацию и приводит к более высокому уровню демпфирующей способности материала.

Весьма важной характеристикой материала является его внутреннее трение. Наличие пор как на границах зерен, так и на их стыках приводит к появлению дополнительного канала диссипации энергии механических колебаний, связанного с деформированием пор, что проявляется в возрастании уровня внутреннего трения [6].

Целью настоящей работы является разработка модели диффузионного формоизменения зернограничных пор, а также влияния их на внутреннее трение в ультрамелкозернистом материале.

## Изменение формы сечения пор при межзеренном проскальзывании

Рассмотрим модель сегмента границы зерен, ограниченного с обеих сторон тройными стыками. Вдоль стыков, а также на внутреннем участке границы, перпендикулярно к плоскости рисунка, располагаются протяженные цилиндрические поры (рис. 1). Общее число пор равно  $N + 2$ .

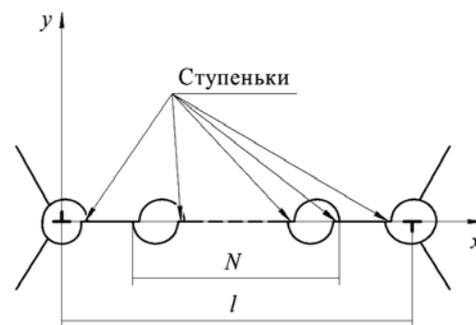


Рис. 1. Расположение ступенек в деформированных порах  
Fig. 1. Location stair in deformed pores

Выберем систему координат с началом отсчета в центре крайней левой поры так, чтобы ось  $x$  была направлена вдоль границы перпендикулярно стыкам, ось  $y$  – нормально к линии границы в плоскости рисунка, а ось  $z$  – параллельно стыкам и перпендику-



лярно плоскости рисунка. Вдоль границы действует переменное сдвиговое напряжение  $\sigma = \sigma_0 e^{i\omega t}$ , которое вызывает взаимное смещение зерен  $u$  таким образом, что в поре образуется ступенька размера  $u$  (рис. 1). Здесь  $\sigma_0$  – амплитуда напряжения;  $\omega$  – циклическая частота;  $t$  – время.

Рассмотрим внутренние поры. В рамках модели примем, что их сечение имеет форму правильного шестиугольника со стороной  $a$  (рис. 2). По обе стороны от ступеньки (в точках  $O$  и  $O'$ ) поверхность поры имеет кривизну разного знака, что с учетом лапласова давления создает градиент химического потенциала вакансий на этом отрезке в направлении, указанном стрелками на рис. 2. В результате перераспределения вещества в поре происходит сглаживание ступеньки с изменением геометрии сечения поры (тонкая линия на рис. 2).

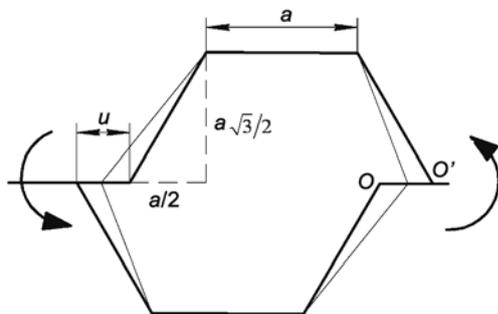


Рис. 2. Залечивание ступеньки в шестиугольной поре  
Fig. 2. Smoothing stairs in hexagon pore

Изменение энергии свободной поверхности поры в этом случае

$$\Delta U = \gamma_0 \Delta, \quad (1)$$

где  $\gamma_0$  – удельная энергия свободной поверхности;  $\Delta$  – изменение периметра сечения поры после трансформации. Находим  $\Delta$  в случае малых смещений  $u < a$ . Поскольку основания шестиугольника после трансформации не были изменены, исключаем их из расчета.

$$\Delta = P_2 - P_1, \quad (2)$$

где  $P_1$  и  $P_2$  – периметры поры с исключенными основаниями до и после релаксации соответственно.

$$P_1 = 4a, \quad (3)$$

$$P_2 = 2\sqrt{\left(\frac{a+u}{2}\right)^2 + \frac{3}{4}a^2} + 2\sqrt{\left(\frac{a-u}{2}\right)^2 + \frac{3}{4}a^2}. \quad (4)$$

Подставляя (3) и (4) в (2), а также разлагая полученное выражение по формуле Тейлора с оставлением слагаемых до третьего порядка по  $u/a$  включительно, получим

$$\Delta = 2\left[ a + \frac{1}{2a}\left(\frac{u^2}{4} + \frac{au}{2}\right) - \frac{1}{8a^3}\left(\frac{u^2}{4} + \frac{au}{2}\right) \right] + 2\left[ a + \frac{1}{2a}\left(\frac{u^2}{4} - \frac{au}{2}\right) - \frac{1}{8a^3}\left(\frac{u^2}{4} - \frac{au}{2}\right) \right] - 4a = \frac{3}{8a}u^2. \quad (5)$$

Изменение поверхностной энергии в сравнении с исходным сечением в виде правильного шестиугольника приводит к возникновению сдвигающей силы в границе:

$$F = -\frac{d(\Delta U)}{du} z, \quad (6)$$

где  $z$  – протяженность поры в направлении, нормальном к рисунку.

Подставляя (1) и (5) в (6), получим

$$F = -\frac{3\gamma_0 zu}{4a}. \quad (7)$$

Вклад одной внутренней поры в напряжение в приближении  $a \ll l$  имеет вид

$$\sigma_1 = -\frac{3\gamma_0 uz}{4a} \frac{1}{S} = -\frac{3\gamma_0 u}{4al}, \quad (8)$$

где  $S = zl$  – площадь сегмента границы, заключенного между стыками. Поле напряжения (8) препятствует действию внешнего напряжения.

Линейность напряжения  $\sigma_1$  по  $u$  имеет общий характер для пор любого сечения. Например, для поры ромбовидного сечения  $\sigma'_1 = -\gamma_0 u / 2al$ , прямоугольного –  $\sigma''_1 = -\gamma_0 u / al$ .

### Зернограничный пик внутреннего трения

Взаимное смещение зерен ограничивается тройными стыками. Характер деформации в стыковых порах подобен дислокационному. Поэтому можно считать, что в стыках зерен расположены сверхдислокации с удаленными цилиндрическими областями ядер радиуса  $a$  и векторами Бюргерса противоположного знака, равными смещению  $u$ , как это показано на рис. 1. Две таких сверхдислокации образуют дислокационный диполь. Сдвиговое напряжение такого диполя  $u_d$  в сегменте противоположно приложенному внешнему напряжению.  $u_d$  определяется суперпозицией напряжений двух краевых дислокаций:

$$\sigma_d = -\frac{Gu}{2\pi(1-\nu)} \frac{1}{x} - \frac{Gu}{2\pi(1-\nu)} \frac{1}{l-x} = -\frac{Gu}{2\pi(1-\nu)} \frac{l}{x(l-x)}, \quad (9)$$

где  $G$  – модуль сдвига;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $x$  и  $(l-x)$  – расстояния от произвольной точки границы до стыков.

Эффективное напряжение дислокационного диполя  $\sigma_{ef}$  найдем, усредняя (9) по длине границы:

$$\sigma_{ef} = -\frac{Gul}{2\pi(1-\nu)l} \int_a^{l-a} \frac{dx}{x(l-x)} = -\frac{G}{\pi(1-\nu)l} \ln \frac{l}{a} u. \quad (10)$$

Внутреннее напряжение на границе является суперпозицией эффективного напряжения диполя (10) и напряжения  $N$  внутренних пор (8):

$$\sigma_{ex} = \sigma_{ef} + \sigma_1 = -\left( \frac{G}{\pi(1-\nu)l} \ln \frac{l}{a} + \frac{3\gamma_0(N+1)}{4al} \right) u = -Bu \quad (11)$$

где  $B = \frac{G}{\pi(1-\nu)l} \ln \frac{l}{a} + \frac{3\gamma_0(N+1)}{4al}$ .

Скорость межзеренного проскальзывания определяется суммой напряжений дислокационного диполя, пор и внешнего приложенного напряжения. В приближении линейной вязкости границы скорость проскальзывания определяется полным напряжением на границе с учетом внешнего:

$$v = I(\sigma_0 e^{i\omega t} - Bu), \quad (12)$$

где  $I$  – подвижность границы по отношению к проскальзыванию (обратная вязкость). Записывая скорость межзеренного проскальзывания в виде  $v = du/dt$ , перепишем (12) как

$$\frac{du}{dt} = I(\sigma_0 e^{i\omega t} - Bu). \quad (13)$$

Уравнение (13) является линейным, поэтому зависимость смещения зерна от времени представляется в виде

$$u = u_0 e^{i\omega t}, \quad (14)$$

где  $u_0$  – комплексная величина.

Найдем смещение зерна  $u$ , подставляя (14) в (13):

$$u = \frac{I\sigma_0}{\sqrt{(BI)^2 + \omega^2}} e^{i(\omega t - \varphi)}; \quad tg\varphi = \frac{\omega}{BI}, \quad (15)$$

где  $\varphi$  – сдвиг фаз между напряжением и смещением. Взяв производную от (15) по  $t$ , получаем выражение для скорости проскальзывания:

$$v = \frac{i\omega I\sigma_0}{\sqrt{(BI)^2 + \omega^2}} e^{i(\omega t - \varphi)}. \quad (16)$$

Внутреннее трение определяется известным выражением  $Q^{-1} = \Delta W / 2\pi W$ , где  $W = \sigma_0^2 V / 2G$  – максимальная упругая энергия в зерне объемом  $V$ ;  $\Delta W$  – энергия, рассеянная за цикл колебаний.

$$\Delta W = S \int_0^{2\pi/\omega} \text{Re}[\sigma(t)] \text{Re}[v(t)] dt, \quad (17)$$

где  $\text{Re}$  – действительная часть комплексной величины.

Из (16) и (17) находим

$$\Delta W = \frac{\pi I \sigma_0^2 \omega S}{(BI)^2 + \omega^2}. \quad (18)$$

Окончательное выражение для внутреннего трения имеет вид

$$Q^{-1} = \frac{GS}{VB} \frac{\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2}, \quad (19)$$

где введено обозначение для времени релаксации  $\tau$ :

$$\tau = I^{-1} \left( \frac{G}{\pi(1-\nu)l} \ln \frac{l}{a} + \frac{3\gamma_0(N+1)}{4al} \right)^{-1}. \quad (20)$$

Отношение  $S/V$  порядка обратного размера зерна  $R^{-1}$ . Поэтому (19) можно записать в виде

$$Q^{-1} = \frac{G}{RB} \frac{\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2}. \quad (21)$$

Полученное выражение (20) описывает дебаевский пик. Если граница не содержит внутренних пор, то в полученном выражении для  $B$  следует  $N$  считать равным нулю. Если вообще не рассматривать образования ступенек на стыковых порах, считая, что происходит полная релаксация их формы, то второе слагаемое вообще можно отбросить.

Проведем численную оценку для субмикросталлической меди вблизи температуры зернограничного максимума  $T = 573$  К на частоте 20 Гц [7]. Значения предэкспоненциального множителя и энергии активации поверхностной диффузии в случае поверхности меди, граничащей с вакуумом, равны, соответственно,  $D_0 = 0,26$  см<sup>2</sup>/с,  $E = 20,7$  ккал/моль [8]. Оценка диффузионной длины по формуле  $l_D = \sqrt{2D_S T}$ , где  $D_S$  – коэффициент поверхностной диффузии;  $T$  – период колебания, дает  $l_D \sim 0,17$  мкм. Отсюда следует, что отличным от нуля второе слагаемое в выражении для времени релаксации  $\tau$  (20) будет при размерах поры порядка  $10^{-7}$  м.

Высота пика обратно пропорциональна размеру зерна. Имеются различные, порой противоречивые сведения об этой зависимости [9]. Однако все авторы сходятся к тому, что общий уровень внутреннего трения в нано- и субмикросталлических материалах в целом гораздо выше, чем в поликристаллах с традиционным размером зерна.

### Выводы

1. В процессе межзеренного проскальзывания по границам зерен, содержащим поры, происходит диффузионная релаксация формы сечения пор.



2. Трансформация геометрической формы пор, расположенных на границе вне стыков, создает в границе напряжение, противодействующее внешнему периодическому напряжению, действующему в системе.

3. Наличие пор в тройных стыках зерен позволяет рассматривать напряженное деформированное состояние приграничных областей подобно дислокационному диполю. Модель внутреннего трения, учитывающая напряжение дислокационного диполя, приводит к появлению в спектре внутреннего трения максимума дебаевского типа.

### Список литературы

1. Грязнов М.Ю., Чувильдеев В.Н., Сысоев А.Н., Копылов В.И. Физика сверхпластичности нано- и микрокристаллических материалов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2010. № 5(2). С. 147-158.
2. Андриевский Р.А., Глезер А.М. Прочность наноструктур // Успехи физических наук. 2009. Т. 179. № 4. С. 337-358.
3. Indeitsev D.A., Morozov N.F., Ovid'ko I.A, Skiba N.V. Nucleation of nanoscale voids at disclination quadrupoles in deformed nanocrystalline materials // Rev. Adv. Mater. Sci. 2010. № 26. P. 91-97.
4. Cooper A. Porous materials and supercritical fluids // Advanced materials. 2003. V. 15, № 13. P. 1049-1059.
5. Кульков В.Г. Релаксационные процессы на границах зерен в металлах. Волжский: Филиал МЭИ в г. Волжском, 2015.
6. Кульков В.Г., Коротков Л.Н., Дешевых В.В. Модель внутреннего трения в пористом нанокристаллическом материале // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2011. Т. 8, № 4. С. 104-108.
7. Blanter M.S. Golovin I.S., Neuhauser H. Sinning H.-R. Internal Friction in Metallic Materials. A Handbook Berlin, Heidelberg: Springer, 2007.
8. Butrymowicz D., Manning J., Read M. Diffusion in Copper and Copper Alloys. Part I. Volume and Surface Self-Diffusion in Copper // J. Phys. Chem. Ref. Data. 1973. Vol. 2(3). P. 643-655.
9. Новик А., Берри Б. Релаксационные явления в кристаллах / Пер. с англ. под ред. Надгорного Э.М., Сойфера Я.М. М.: Атомиздат, 1975.

### References

1. Grâznov M.Û., Čuvil'deev V.N., Sysoev A.N., Kopylov V.I. Fizika sverhplastičnosti nano- i mikro-kristalličeskikh materialov // Vestnik Nižegorodskogo universiteta im. N.I. Lobačevskogo. 2010. № 5(2). S. 147-158.
2. Andrievskij R.A., Glezer A.M. Pročnost' nanostruktur // Uspehi fizičeskikh nauk. 2009. T. 179. № 4. S. 337-358.
3. Indeitsev D.A., Morozov N.F., Ovid'ko I.A, Skiba N.V. Nucleation of nanoscale voids at disclination quadru-poles in deformed nanocrystalline materials // Rev. Adv. Mater. Sci. 2010. № 26. P. 91-97.
4. Cooper A. Porous materials and supercritical fluids // Advanced materials. 2003. V. 15, № 13. P. 1049-1059.
5. Kul'kov V.G. Relaksacionnye processy na granicah zeren v metallah. Volžskij: Filial MĖI v g. Volžskom, 2015.
6. Kul'kov V.G., Korotkov L.N., Deševyh V.V. Model' vnutrennego treniâ v poristom nanokristalličeskom materiale // Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniâ. 2011. T. 8, № 4. S. 104-108.
7. Blanter M.S. Golovin I.S., Neuhauser H. Sinning H.-R. Internal Friction in Metallic Materials. A Handbook Berlin, Heidelberg: Springer, 2007.
8. Butrymowicz D., Manning J., Read M. Diffusion in Copper and Copper Alloys. Part I. Volume and Surface Self-Diffusion in Copper // J. Phys. Chem. Ref. Data. 1973. Vol. 2(3). P. 643-655.
9. Novik A., Berri B. Relaksacionnye âvleniâ v kristallah / Per. s angl. pod red. Nadgornogo È.M., Soj-fera Â.M. M.: Atomizdat, 1975.

Транслитерация по ISO 9:1995

