

Внутреннее трение на границах зерен в нанокристаллическом материале с порами

В.Г. Кульков, В.В. Кулькова

*Филиал ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет
«Московский Энергетический Институт» в городе Волжском
404110, Россия, Волгоградская обл., г. Волжский, пр-т Ленина, 69
vikulkov@yandex.ru*

DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.670

Аннотация: Рассматривается математическая модель внутреннего трения в поликристаллическом материале с наномасштабным размером зерен. Их границы содержат поры, как в тройных стыках зерен, так и между ними. Под действием переменных нормальных границе напряжений плоские участки границы являются периодически действующими источниками и стоками вакансий. Вследствие наличия этих потоков осуществляется взаимное смещение смежных зерен. В зависимости от температуры диффузионная длина вакансий меньше, либо сравнивается с расстоянием между порами. На графике зависимости внутреннего трения от температуры имеется излом между прямолинейными участками. Из положения излома можно оценить средний размер плоских участков границы. Эффективная энергия активации процесса в этих случаях зависит от температуры и различается в два раза. При температурах, когда концентрация тепловых вакансий в границе превышает геометрически необходимую величину концентрации структурных вакансий, энергия активации еще более увеличивается. Температура перехода к этому значению определяется степенью неравновесности структуры границы.

Ключевые слова: нанокристаллический материал, границы зерен, диффузионная длина, поры, вакансии, внутреннее трение, энергия активации.

1. Введение

Принято считать, что нанокристаллические материалы характеризуются очень малым размером зерен, не более 100 нм. В таком состоянии значительная доля атомов всего образца принадлежит зернограницной фазе [1-3]. Например, при размере зерен 10 нм расчеты показывают, что почти 25% материала присутствует на границах зерен и тройных стыках [3]. Атомное строение межкристаллитных границ в значительной степени определяется методом приготовления образцов [4]. Их структура может иметь сравнительно низкую энергию и не содержать в себе избыточных поглощенных дефектов, таких, например, как дислокации или дисклинации. Обычно они мало изменяют с течением времени своего атомного строения. В известной мере их можно считать равновесными. Другие границы имеют повышенную энергию, содержат в себе поглощенные из решетки дефекты, могут обладать дальнodelствующими напряжениями. Границы зерен второго типа называют неравновесными [5, 6]. Отличительной их чертой является то, что они имеют избыточный свободный объем [2, 3, 7].

После определенного времени выдержки при температурах отжига,

которые могут быть ниже таковых для поликристаллов с большим размером зерна, структура неравновесных границ приближается к структуре первого типа. Релаксация границ зерен приводит к увеличению твердости, предела прочности при растяжении, усталостной стойкости [2, 8]. Все это существенно улучшает термодинамическую стабильность наноструктур. При исследовании методом рентгеновской дифракции после релаксации наблюдалось уменьшение межплоскостного расстояния. Это было связано с диффузией и устранением избыточных вакансий на границах зерен и тройных стыков [9].

Некоторые технологии получения нанокристаллических материалов приводят к появлению в конечном продукте определенной величины пористости [4, 10]. Экспериментальные исследования показывают [11], что часто поры располагаются на границах зерен или в их тройных стыках. Термодинамическим стимулом этого является стремление к уменьшению свободной энергии системы [12]. Исследование параметров пористой структуры материала можно проводить с использованием метода внутреннего трения [13, 14]. В работе [15] применен новый подход, основанный на механической спектроскопии образцов микронного размера, проводимой в колонне сканирующего электронного микроскопа. Было обнаружено снижение внутреннего трения в ультрамелкозернистых материалах примерно на 50% после отжига образцов и релаксации границ зерен от исходного сильно неравновесного состояния к равновесному.

Целью настоящей работы является описание модели фона внутреннего трения в нанокристаллическом материале, границы зерен в котором содержат поры, а также определение величины энергии активации процесса в различных температурных интервалах в зависимости от состояния границ.

2. Описание модели

В качестве модельного рассмотрим плоский участок границы, ограниченный с обеих сторон тройными стыками с расположенными вдоль них цилиндрическими порами. Внутренняя область границы также содержит параллельные стыкам цилиндрические поры того же радиуса r . Подобная пористая структура часто используется в качестве модельной при рассмотрении границы зерен в наноструктурных материалах [16, 17].

Задача имеет одномерный характер. Сечение границы изображено на рис. 1. Ось x направим вдоль границы от точки O к точке B . Нормально к границе приложено переменное напряжение $\sigma(t)$. В результате его действия участки, подобные OB , являются периодически действующими с частотой ω источниками вакансий плотности $A \exp(i\omega t)$. Напряжения в точках O и B обращаются в ноль.

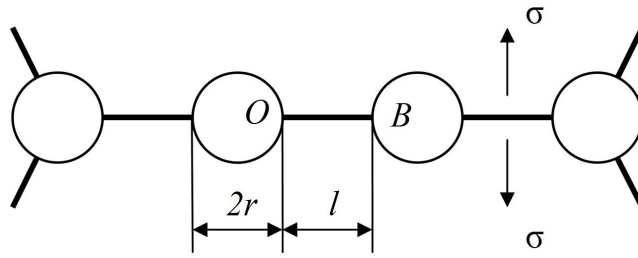


Рис. 1. Схематическое изображение участка границы.

Вакансии, генерируемые на границе, движутся вдоль нее, поскольку диффузией их в объем пренебрегаем вследствие малости объемного коэффициента диффузии в сравнении с зернограницным. Уравнение их неоднородной диффузии можно записать в виде:

$$\frac{\partial c(x,t)}{\partial t} = D_b \frac{\partial^2 c(x,t)}{\partial x^2} + A \exp(i\omega t). \quad (1)$$

Здесь $c(x,t)$ – избыточная по сравнению с равновесной концентрация вакансий на границе зерна, D_b – коэффициент зернограницной диффузии вакансий, t – время. Нулевые граничные условия имеют вид: $c(0,t) = c(l,t) = 0$.

Решением (1) является функция

$$c(x,t) = \exp(i\omega t) \sum_m \frac{4Al^2 \exp(-i\varphi_m) \sin\left(\frac{\pi mx}{l}\right)}{\pi^3 D_b m \sqrt{m^4 + Z^2}}. \quad (2)$$

Здесь введены обозначения $Z = \frac{\omega l^2}{\pi^2 D_b}$, $\tan \varphi_m = \frac{\omega l^2}{D_b \pi^2 m^2}$, $m = 1, 3, 5, \dots$

Избыточная концентрация вакансий в границе линейно связана с распределенным вдоль границы нормальным напряжением:

$$\sigma_n(x,t) = c(x,t) kT / c_0 \Omega. \quad (3)$$

Здесь c_0 – равновесная в границе концентрация вакансий, Ω – атомный объем, k – фактор Больцмана. С учетом (2) выражение (3) принимает вид:

$$\sigma_n(x,t) = \exp(i\omega t) \frac{4Al^2 kT}{\pi^3 D_b c_0 \Omega} \sum_m \frac{\exp(-i\varphi_m) \sin \frac{\pi mx}{l}}{m \sqrt{m^4 + Z^2}}. \quad (4)$$

В выражениях (2) и (4) множитель A можно определить из равенства приложенной к границе внешней силы полной распределенной по участку OB внутренней силе: $|\sigma_0 l \exp(i(\omega t - \varphi))| = \left| \int_0^l \sigma_n(x,t) dx \right|$, где σ_0 – амплитуда приложенного к границе напряжения, которое в общем случае не совпадает по фазе φ с распределенным источником вакансий. Прямые

скобки обозначают модуль величины. Выполнив интегрирование, получаем для множителя A выражение:

$$A = \frac{\pi^2 \sigma_0 c_0 \Omega \omega}{4kT} \left(\left(\sum_m \frac{Z}{m^4 + Z^2} \right)^2 + \left(\sum_m \frac{Z^2}{m^2(m^4 + Z^2)} \right)^2 \right)^{-1/2}.$$

Скорость взаимного движения зерен под действием напряжения определяется суммарным потоком вакансий j из участка OB через обе его границы $v = \frac{j\delta\Omega}{l}$, где δ – диффузионная толщина границы зерна.

$$j = D_b \left(\frac{\partial c(0,t)}{\partial x} - \frac{\partial c(l,t)}{\partial x} \right) = -D_b \int_0^l \frac{\partial^2 c(x,t)}{\partial x^2} dx. \quad (5)$$

Воспользовавшись (1), находим скорость взаимного смещения:

$$v = A\delta\Omega \exp(i\omega t) - \frac{i\omega\sigma_0 c_0 \delta \Omega^2}{kT} \exp(i\omega t - \varphi). \quad (6)$$

Внутреннее трение найдем [18] из выражения $Q_1^{-1} = \frac{\Delta W_1}{2\pi W}$, где $W = \frac{V_0 \sigma_0^2}{2E}$ – упругая энергия, запасенная в объеме зерна V_0 , E – модуль Юнга, а величина рассеянной за цикл энергии дается выражением:

$$\Delta W_1 = R \int_0^l \int_0^{2\pi/\omega} \text{Re}(\sigma(x,t)) \text{Re}(v(t)) dx dt. \quad (7)$$

Здесь Re означает действительную часть комплексного числа. Интегрируя (7) с учетом выражения для A , получим

$$Q^{-1} = \frac{\pi^2 \beta E (2r+l)^2 c_0 \delta \Omega^2}{kTRl^2} F(Z), \quad (8)$$

$$F(Z) = \frac{1}{Z} \sum_m \frac{1}{m^4 + Z^2} \left(\left(\sum_m \frac{1}{m^4 + Z^2} \right)^2 + \left(\sum_m \frac{Z}{m^2(m^4 + Z^2)} \right)^2 \right)^{-1}.$$

В этом выражении учтено, что отношение объема зерна к площади одного участка границы между стыками с размером $L \approx R$ порядка R^{-1} , где R – средний размер зерна. На одном таком участке может находиться $L/(2r+l)$ рассмотренных элементов структуры, состоящих из одной поры и примыкающего к ней плоского фрагмента границы. Поскольку зерна сопрягаются между собой только на длине l , а пора противодействует внешнему усилию не оказывает, эффективная величина напряжения и скорости будут больше каждая в $(2r+l)/l$ раз. Коэффициент β в (8) учитывает ориентацию фрагментов границы и реальную форму зерен.

3. Обсуждение результатов

На рис. 2 изображен график зависимости $\lg F(Z)$ от $\lg Z$. Учитывая

приведенные выше выражения для $F(Z)$ и Z , можно считать, что на рисунке изображена зависимость $Q^{-1} \cdot T$ от обратной температуры, как это обычно делается, с точностью до постоянного слагаемого.

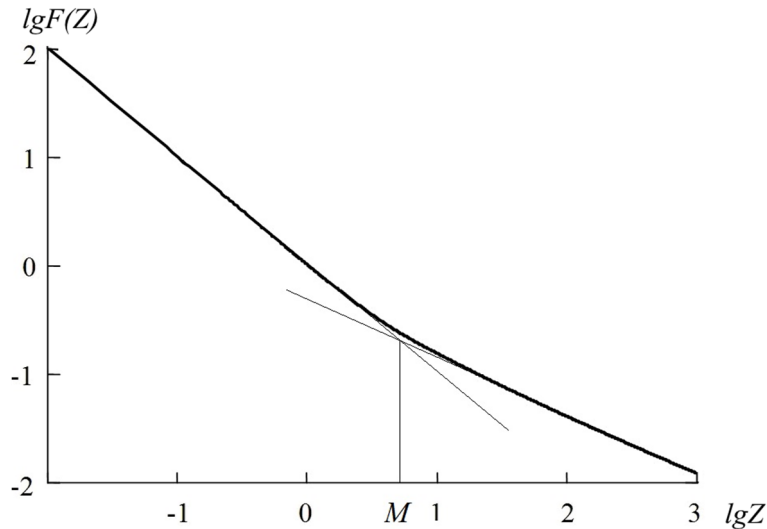


Рис. 2. Зависимость величины $\lg F(Z)$ от $\lg Z$.

Как видно из рисунка график зависимости состоит из двух явно выраженных прямолинейных участков с двумя различными наклонами. Наличие одного излома на зависимости $Q^{-1} \cdot T$ от обратной температуры в аморфных и поликристаллических образцах обсуждалось в ряде работ [19-21]. Его возникновение связывается с ростом диффузионной длины вакансий при увеличении температуры и достижении ее значения, равного размеру плоских участков границы. При дальнейшем росте температуры диффузионная длина более не изменяется. Из положения излома можно оценить размер плоских участков. С учетом выражения для Z имеем:

$$\lg Z = M, \quad L = \pi \sqrt{\frac{D_b}{\omega} \exp(2,3M)}.$$

Тангенс угла наклона определяет энергию активации процесса. Коэффициент диффузии вакансий в границе имеет вид $D_b = D_{0b} \exp\left(-\frac{U_m}{kT}\right)$, где U_m – энергия активации миграции вакансий. Учитывая наличие в границе зерна избыточного свободного объема в достаточном количестве даже в равновесном состоянии, для диффузии вакансий нет необходимости их генерировать, достаточно структурных зернограницных вакансий, поэтому энергия активации диффузии содержит только энергию их миграции U_m . Высокие температуры реализуют диффузионный процесс в полной мере. При низких температурах процесс реализуется частично, поэтому эффективная энергия активации внутреннего трения равна лишь половине этой величины $U_m/2$.

Концентрация структурных вакансий в равновесной границе постоянна и практически не зависит от температуры. Концентрация же тепловых вакансий в границе зерна определяется выражением $c_T = c_{0T} \exp\left(-\frac{U_f}{kT}\right)$, где U_f – энергия их образования, c_{0T} – постоянная порядка единицы. Эта концентрация может превысить концентрацию структурных вакансий лишь при температурах выше некоторой критической, впрочем, достаточно близкой к температуре плавления. Тогда энергия активации внутреннего трения будет равна $U_f + U_m$. На графике в этом случае вблизи температуры плавления появляется еще один излом с увеличенным значением тангенса угла наклона. Как показано в начале статьи, большая доля границ зерен в нанокристаллическом материале находится в неравновесном состоянии, предполагающем наличие в них избыточного в сравнении с равновесным состоянием свободного объема, т.е. повышенной концентрации вакансий. Превышение концентрации тепловых вакансий тогда произойдет при более высоких значениях температур. Если степень неравновесности будет высока, то новый излом может вообще не появиться вплоть до температуры плавления. Температурное положение этого излома позволяет оценить степень неравновесности межзеренной границы.

4. Заключение

Предложенная модель внутреннего трения объясняет наблюдаемые в эксперименте различные значения энергии активации одних и тех же процессов рассеяния энергии в зависимости от температуры и состояния границ зерен.

Показано, что энергия активации может принимать значения, равные половине энергии активации зернограницной миграции вакансий при низких температурах, ее целой величине при более высоких температурах и энергии активации граничной диффузии их при наиболее высоких температурах. Температура перехода к последнему режиму зависит от степени неравновесности атомной структуры границы.

Библиографический список:

1. Гусев, А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А.И. Гусев. – М.: Физматлит, 2005. – 416 с.
2. Matsui, I. Relationship between grain boundary relaxation strengthening and orientation in electrodeposited bulk nanocrystalline Ni alloys / I. Matsui, M. Kanetake, H. Mori, Y. Takigawa, K. Higashi // Materials Letters. – 2017. – V. 205. – P. 211-214. DOI: 10.1016/j.matlet.2017.06.094.
3. Varshney, P. Effect of grain boundary relaxation on the corrosion behaviour of nanocrystalline Ni-P alloy / P. Varshney, S. Chhangani, M.J.N.V. Prasad, S. Pati, S. Gollapudi // Journal of Alloys and Compounds. – 2020. – V. 830. – Art. № 154616. – 9 p. DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.154616.
4. Мулюков, Р.Р. Сверхпластичность ультрамелкозернистых сплавов: Эксперимент, теория, технологии / Р.Р. Мулюков, Р.М. Имаев, А.А. Назаров и др.; под ред. Р.Р. Мулюкова и др. – М.: Наука, 2014. – 284 с.

5. **Nazarov, A.A.** On the structure, stress fields and energy of nonequilibrium grain boundaries / A.A. Nazarov, A.E. Romanov, R.Z. Valiev // *Acta Metallurgica et Materialia*. – 1993. – V. 41. – I. 4. – P. 1033-1040. DOI: 10.1016/0956-7151(93)90152-I.
6. **Чувильдеев, В.Н.** Неравновесные границы зерен в металлах. Теория и приложения / В.Н. Чувильдеев. – М.: Физматлит, 2004. – 304 с.
7. **Shabashov, V.A.** Deformation-induced nonequilibrium grain-boundary phase in submicrocrystalline iron / V.A. Shabashov, V.V. Ovchinnikov, R.R. Mulyukov, R.Z. Valiev, N.P. Filippova // *Nanostructured Materials*. – 1999. – V. 11. – I. 8. – P. 1017-1029. DOI: 10.1016/S0965-9773(99)00383-9.
8. **Андриевский, Р.А.** Прочность наноструктур / Р.А. Андриевский, А.М. Глезер // *Успехи физических наук*. – 2009. – Т. 179. – Вып. 337. – С. 337-358. DOI: 10.3367/UFNr.0179.200904a.0337.
9. **Chai, Z.** The kinetics of nanostructural relaxation in electrodeposited Ni upon low-temperature annealing: an in-situ X-ray diffraction investigation / Z. Chai, Z. Yu, X. Chen // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2022. – V. 18. – P. 4099-4103. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.04.098.
10. **Бетехтин, В.И.** Влияние противодействия при равноканальном угловом прессовании на образование нанопористости в ультрамелкозернистой меди / В.И. Бетехтин, Е.Д. Табачникова, А.Г. Кадомцев, М.В. Нарыкова, Р. Ларовок // *Письма в журнал технической физики*. – 2011. – Т. 37. – Вып. 16. – С. 52-55.
11. **Бетехтин, В.И.** Нанопористость ультракристаллических алюминия и сплава на его основе / В.И. Бетехтин, А.Г. Кадомцев, V. Sklenicka, I. Saxl // *Физика твердого тела*. – 2007. – Т. 49. – Вып. 10. – С. 1787-1790.
12. **Hartland, P.** Grain growth with boundary pores / P. Hartland, A.G. Crocker, M.O. Tucke // *Journal of Nuclear Materials*. – 1988. – V. 152. – I. 2-3. – P. 310-322. DOI: 10.1016/0022-3115(88)90342-X.
13. **Blanter, M.S.** Internal friction in metallic materials. A handbook / M.S. Blanter, I.S. Golovin, H. Neuhauser, H.-R. Sinning // In: *Springer Series in Materials Science*. – V. 90. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2007, – XVII, 542 p. DOI: 10.1007/978-3-540-68758-0.
14. **Дешевых, В.В.** Высокотемпературный фон внутреннего трения в нанокпозиционном материале / В.В. Дешевых, В.Г. Кульков, Л.Н. Коротков, Д.П. Тарасов // *Композиты и наноструктуры*. – 2012. – № 2 (14). – С. 24-34.
15. **Alfreider, M.** Probing defect relaxation in ultra-fine grained Ta using micromechanical spectroscopy / M. Alfreider, I. Issa, O. Renk, D. Kiener // *Acta Materialia*. – 2020. – V. 185. – P. 309-319. DOI: 10.1016/j.actamat.2019.12.011.
16. **Кульков, В.Г.** Зернограничное внутреннее трение в пористом ультрамелкозернистом материале / В.Г. Кульков, В.В. Кулькова // *Альтернативная энергетика и экология*. – 2015. – № 17-18. – С. 100-104. DOI: 10.15518/isjaee.2015.17-18.014.
17. **Кульков, В.Г.** Внутреннее трение на границах зерен, содержащих протяженные поры / В.Г. Кульков, А.А. Сыщиков // *Письма в журнал технической физики*. – 2019. – Т. 45. – Вып. 3. – С. 23-25. DOI: 10.21883/PJTF.2019.03.47267.17580.
18. **Новик, А.** Релаксационные явления в кристаллах / А. Новик, Б. Берри; пер. с англ. – М.: Атомиздат, 1975. – 472 с.
19. **Золотухин, И.В.** О высокотемпературном фоне внутреннего трения в кристаллических и аморфных твердых телах / И.В. Золотухин, Ю.Е. Калинин // *Физика твердого тела*. – 1995. – Т. 37. – Вып. 2. – С. 536-545.
20. **Калинин, Ю.Е.** Высокотемпературный фон внутреннего трения в твердых телах / Ю.Е. Калинин, Б.М. Даринский // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2012. – № 5. – С. 15-18.
21. **Гриднев, С.А.** О вакансионной природе высокотемпературного фона внутреннего трения в твердых телах / С.А. Гриднев, Ю.Е. Калинин // *Журнал технической физики*. – 2022. – Т. 92. – Вып. 2. – С. 242-249. DOI: 10.21883/jtf.2022.02.52013.146-21.

References:

1. Gusev A.I. *Nanomaterialy, nanostruktury, nanotekhnologii* [*Nanomaterials, nanostructures, nanotechnologies*], Moscow, Fizmatlit Publ., 2005, 416 p. (In Russian).
2. Matsui I., Kanetake M., Mori H., Takigawa Y., Higashi K. Relationship between grain boundary relaxation strengthening and orientation in electrodeposited bulk nanocrystalline Ni alloys, *Materials Letters*, 2017, vol. 205, pp. 211-214. DOI: 10.1016/j.matlet.2017.06.094.
3. Varshney P., Chhangani S., Prasad M.J.N.V., Pati S., Gollapudi S. Effect of grain boundary relaxation on the corrosion behaviour of nanocrystalline Ni-P alloy, *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, vol. 830, art. no. 154616, 9 p. DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.154616.

4. Mulyukov R.R., Imaev R.M., Nazarov A.A. et al. *Sverkhplastichnost' ul'tramelkozernistykh splavov: Eksperiment, teoriya, tekhnologii* [Superplasticity of ultrafine-grained alloys: Experiment, theory, technology], Moscow, Nauka Publ., 2014, 284 p. (In Russian).
5. Nazarov A.A., Romanov A.E., Valiev R.Z. On the structure, stress fields and energy of nonequilibrium grain boundaries, *Acta Metallurgica et Materialia*, 1993, vol. 41, issue 4, pp. 1033-1040. DOI: 10.1016/0956-7151(93)90152-I.
6. Chuvil'deev V.N. *Neravnovesnye granitsy zeren v metallakh. Teoriya i prilozheniya* [Nonequilibrium grain boundaries in metals. Theory and Applications], Moscow, Fizmatlit Publ., 2004, 304 p. (In Russian)
7. Shabashov V.A., Ovchinnikov V.V., Mulyukov R.R., Valiev R.Z., Filippova N.P. Deformation-induced nonequilibrium grain-boundary phase in submicrocrystalline iron, *Nanostructured Materials*, 1999, vol. 11, issue 8, pp. 1017-1029. DOI: 10.1016/S0965-9773(99)00383-9.
8. Andrievski R.A., Glezer A.M. Strength of nanostructures, *Physics-Uspekhi*, 2009, vol. 52, issue 4, pp. 315-334. DOI: 10.3367/UFNe.0179.200904a.0337.
9. Chai Z., Yu Z., Chen X. The kinetics of nanostructural relaxation in electrodeposited Ni upon low-temperature annealing: an in-situ X-ray diffraction investigation, *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, vol. 18, pp. 4099-4103. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.04.098.
10. Betekhtin V.I., Tabachnikova E.D., Kadomtsev A.G., Narykova M.V., Lapovok R. Effect of counterpressure during equal-channel angular pressing on nanoporosity formation in ultrafine-grained copper, *Technical Physics Letters*, 2011, vol. 37, issue 8, pp. 767-768. DOI: 10.1134/S1063785011080189.
11. Betekhtin V.I., Kadomtsev A.G., Sklenicka V., Saxl I. Nanoporosity of fine-crystalline aluminum and an aluminum-based alloy, *Physics of the Solid State*, 2007, vol. 49, issue 10, pp. 1874-1877. DOI: 10.1134/S1063783407100101.
12. Hartland P., Crocker A.G., Tucker M.O. Grain growth with boundary pores, *Journal of Nuclear Materials*, 1988, vol. 152, issue 2-3, pp. 310-322. DOI: 10.1016/0022-3115(88)90342-X.
13. Blanter M.S., Golovin I.S., Neuhauser H. Sinning H.-R. *Internal friction in metallic materials. A handbook, Springer Series in Materials Science*, vol. 90. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2007, XVII, 542 p. DOI: 10.1007/978-3-540-68758-0.
14. Deshevyy V.V., Kul'kov V.G., Korotkov L.N., Tarasov D.P. Vysokotemperaturnyj fon vnutrennego treniya v nanokompozitsionnom materiale [High-temperature internal friction background in nanocomposite material], *Kompozity i nanostruktury* [Composites and Nanostructures], 2012, no. 2, pp. 24-34. (In Russian).
15. Alfreider M., Issa I., Renk O., Kiener D. Probing defect relaxation in ultra-fine grained Ta using micromechanical spectroscopy, *Acta Materialia*, 2020, vol. 185, pp. 309-319 DOI: 10.1016/j.actamat.2019.12.011.
16. Kul'kov V.G., Kul'kova V.V. Zernogranichnoe vnutrennee trenie v poristom ul'tramelkozernistom materiale [The grain boundary internal friction in a porous ultra-fine grained material], *Alternativnaya energetika i ekologiya* [Alternative Energy and Ecology (ISJAE)], 2015, vol. 17-18, pp. 100-104. DOI: 10.15518/isjaee.2015.17-18.014. (In Russian).
17. Kul'kov, V.G., Syshchikov, A.A. Internal friction at the grain boundaries with elongated pores, *Technical Physics Letters*, 2019, vol. 45, issue 2, pp. 82-84. DOI: 10.1134/S106378501902010X.
18. Nowick A.S., Berry B.S. *Anelastic relaxation in crystalline solids*, New York, London, Academic Press Publ., 1972, 677 p. DOI: 10.1016/B978-0-12-522650-9.X5001-0.
19. Zolotukhin, I.V., Kalinin, Yu.E. O vysokotemperaturnom fone vnutrennego treniya v kristallicheskih i amorfnykh tverdykh telakh [On the high-temperature background of internal friction in crystalline and amorphous solids], *Fizika tverdogo tela* [Physics of the Solid State], 1995, vol. 37, issue 2, pp. 536-545. (In Russian).
20. Kalinin Yu.E., Darinskii B.M. High-temperature background of internal friction in alloys, *Metal Science and Heat Treatment*, 2012, vol. 54, issue 5-6, pp. 221-223. DOI: 10.1007/s11041-012-9485-4.
21. Gridnev S.A., Kalinin Y.E. On the vacancy nature of the high-temperature background of internal friction in solids, *Technical Physics*, 2022, vol. 92, issue 2, pp. 196-202. DOI: 10.21883/TP.2022.02.52947.146-21.

Original paper

Internal friction at grain boundaries in nanocrystalline material with pores

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

*Branch of the National Research University «Moscow Power Engineering Institute» in Volzhsky,
Volzhsky, Russia*

DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.670

Abstract: A mathematical model of the internal friction in a polycrystalline material with the

nanoscale grain size is considered. Their boundaries contain pores, both in the triple joints of the grains and between them. Under the influence of the alternating normal boundary stresses, flat sections of the boundary are periodically active sources and sinks for vacancies. Due to the presence of these flows, the mutual displacement of adjacent grains is carried out. Depending on temperature, the diffusion length of the vacancies is smaller or compared with the distance between the pores. In the graph of the dependence of the internal friction on temperature, there is a break between the rectilinear sections. From the position of the fracture, the average size of the flat sections of the border can be estimated. The effective activation energy of the process in these cases depends on temperature and differs twice. At temperatures when the concentration of thermal vacancies in the boundary exceeds the geometrically necessary value of the concentration of structural vacancies, the activation energy increases even more. The transition temperature to this value is determined by the degree of imbalance of the boundary structure. *Keywords: nanocrystalline material, grain boundaries, diffusion length, pores, vacancies, internal friction, activation energy.*

Кульков Виктор Геннадьевич – д.ф.-м.н., профессор филиала ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Московский Энергетический Институт» в городе Волжском
Кулькова Валентина Викторовна – к.ф.-м.н., доцент филиала ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Московский Энергетический Институт» в городе Волжском

Viktor G. Kul'kov – Dr. Sc., Professor, Branch of the National Research University «Moscow Power Engineering Institute» in Volzhsky
Valentina V. Kul'kova – Ph. D., Associate Professor, Branch of the National Research University «Moscow Power Engineering Institute» in Volzhsky

Поступила в редакцию/received: 20.08.2024; после рецензирования/revise: 06.09.2024; принята/accepted 09.09.2024.