

## **ВНУТРЕННЕЕ ТРЕНИЕ, ОБУСЛОВЛЕННОЕ МИГРАЦИЕЙ МЕЖКРИСТАЛЛИТНОЙ ГРАНИЦЫ В МЕТАЛЛЕ**

В.Г. Кульков, В.В. Кулькова

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

DOI: 10.26456/pcascnn/2022.14.159

**Аннотация:** Рассматривается модель внутреннего трения на мигрирующей межкристаллитной границе. Под действием переменного внешнего напряжения, ориентированного нормально к границе, происходит сжатие и растяжение сопрягающихся кристаллитов. Вследствие их анизотропии и взаимного разворота модули Юнга в направлении действия напряжения различны. Объемная плотность упругой энергии в кристаллитах различна. Это приводит к возникновению эффективной движущей силы миграции границы. В качестве модели выбран квадратный сегмент границы, закрепленный по периметру тройными стыками зерен. Противодействующим является напряжение Лапласа со стороны искривленной границы. Дифференциальное уравнение связи смещения границы с полным напряжением решается методом Фурье. На основе этого решения рассчитывается внутреннее трение. Спектр времен релаксации состоит из серии линий. Каждая из них соответствует пику Дебая. Главный пик имеет значительную величину, на него накладываются более мелкие пики. Результирующий максимум внутреннего трения уширяется по сравнению с пиком Дебая.

*Ключевые слова:* движущая сила, миграция межкристаллитной границы, пик внутреннего трения, время релаксации.

### **1. Введение**

Метод внутреннего трения является весьма эффективным инструментом исследования структуры и физических свойств кристаллических и аморфных металлических материалов [1, 2]. В некоторых ситуациях он является единственно возможным, например, при исследовании диффузионной подвижности примесных атомов в области низких температур, когда обычным диффузионным экспериментом не удастся определить основные параметры процесса [3]. Этот метод позволяет исследовать геометрические, кинетические и энергетические параметры структурных дефектов, таких как вакансии, примесные атомы, дислокации, границы зерен и другие. В нанокристаллических материалах свойства границ зерен оказывают важнейшее влияние на их макроскопические параметры [4, 5]. Это связано со значительной относительной долей атомов всего образца, принадлежащих области границ.

Впервые зернограничный пик внутреннего трения был обнаружен Ке на образцах поликристаллического алюминия в 1947 году [6]. Релаксационный процесс связан с проскальзыванием по границам зерен.

Такой механизм зернограничной релаксации присущ металлам как с обычным размером зерна [7], так и наномасштабным [8]. Зависимость величины внутреннего трения от температуры может иметь вид максимума, либо плавно увеличивающегося фона. Реальные границы зерен в металлах неизбежно содержат различного рода дефекты, такие как ступеньки, поры и др. Это приводит либо к уширению пика внутреннего трения [9], либо к различным значениям энергии активации [10].

Основными видами деформации, связанной с границами зерен, являются межзеренное проскальзывание и миграция границ. Существует несколько моделей миграции [11-14]. Они описывают перестройку атомной структуры в специальных границах или в границах зерен общего типа. В первых из них используются дислокационные представления, во вторых рассматриваются диффузионные смещения атомов вдоль и поперек границы. Среди движущих сил миграции рассматриваются капиллярные силы, обусловленные действием поверхностной энергии границ, неравновесная дефектная структура одного из двух зерен, анизотропия упругих модулей сопрягающихся по границе зерен и др. [11, 15]. Метод внутреннего трения используют для исследования миграции границ зерен и влияния различных микроструктур, создаваемых сильной пластической деформацией, на термическую стабильность сплавов [16].

Целью настоящей работы является разработка модели внутреннего трения, обусловленного миграцией границы зерен под воздействием приложенного периодического напряжения.

## **2. Описание модели**

Рассмотрим плоский участок межзеренной границы в форме квадрата со стороной  $L$ , ограниченный со всех сторон тройными стыками зерен. Оси координат  $x$  и  $y$  направим вдоль сторон квадрата, а начало совместим с его вершиной. Периодическое внешнее напряжение действует нормально к рассматриваемому участку. Каждый из сопрягающихся вдоль границы кристаллитов является монокристаллом с присущей ему анизотропией упругих свойств. Ориентация таких кристаллитов такова, что их модули Юнга вдоль направления приложенного напряжения имеют различные величины. Действие этого напряжения приводит к различной деформации кристаллитов. В таких условиях энергия атомов в кристаллических решетках по обе стороны границы различна, что вызывает эффективную движущую силу миграции [11]. Под действием переменного напряжения

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cos(\omega t) \quad (1)$$

атомы одного из кристаллитов имеют повышенную энергию, причем ввиду квадратичной зависимости энергии от величины напряжения направление

движущей силы остается одним и тем же для растяжения или сжатия кристаллитов. Эта сила имеет размерность напряжения и направлена в сторону кристаллита с меньшим значением модуля Юнга

$$f(t) = \frac{\sigma^2(t)}{2} \left( \frac{1}{E_1} - \frac{1}{E_2} \right) = B + f_1(t), \quad f_1(t) = B \cos(2\omega t). \quad (2)$$

Здесь  $B = \frac{\sigma_0^2}{4} \left( \frac{1}{E_1} - \frac{1}{E_2} \right)$ ,  $\sigma_0$  – амплитуда приложенного напряжения,

$E_{1,2}$  – Модули Юнга сопрягающихся зерен в направлении нормали. Противодействующая сила связана с изменением поверхностной энергии искривленной границы  $\frac{2\gamma}{R}$ , где  $\gamma$  – удельная поверхностная энергия

границы,  $R$  – радиус кривизны, одинаковый для каждой из осей координат. Под действием этих двух сил граница совершает колебания относительно некоторого среднего положения. Оно определяется средним за длительный промежуток времени значением движущей силы, равным первому слагаемому справа в первой формуле (2). При рассмотрении процесса следует учесть, что все стороны квадрата являются тройными стыками зерен и их смещения равны нулю.

Под действием этих сил граница движется со скоростью

$$\frac{du(x, y, t)}{dt} = l \left( f(t) - \frac{2\gamma}{R} \right). \quad (3)$$

Здесь  $u(x, y, t)$  – нормальное смещение границы,  $l$  – ее миграционная подвижность. Для кривизны поверхности используем известное из анализа выражение  $\frac{1}{R} = -\frac{u''_{xx}(x, y, t)}{(1 + (u'_x(x, y, t))^2)^{3/2}}$ . Пренебрегая вторым слагаемым в

знаменателе, получаем  $R^{-1} = -u''_{xx}(x, y, t)$ . То же относится и ко второй переменной  $y$ . Первое слагаемое справа в (2) не зависит от времени и приводит к статической деформации границы. Внутреннее трение обусловлено колебаниями границы, которые происходят только под действием второго слагаемого справа в (2). Используя принцип суперпозиции решений дифференциального уравнения, достаточно рассматривать только это слагаемое. С учетом этого уравнение (3) в комплексной форме можно записать в виде

$$\frac{du(x, y, t)}{dt} - l\gamma \left( \frac{\partial^2 u(x, y, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u(x, y, t)}{\partial y^2} \right) = IB \exp(2i\omega t). \quad (4)$$

Граничные условия имеют вид

$$u(0, y, t) = u(L, y, t) = u(x, 0, t) = u(x, L, t) = 0. \quad (5)$$

Далее решая задачу (4), (5) методом Фурье. Для этого представляем

решение в виде  $u(x,y,t) = \exp(2i\omega t) \sum_{m,n} c_{mn} \sin \frac{\pi mx}{L} \sin \frac{\pi ny}{L}$ . Произведение  $IB$  также представим в виде двойного ряда Фурье  $IB = \sum_{m,n} b_{mn} \sin \frac{\pi mx}{L} \sin \frac{\pi ny}{L}$ , где  $b_{mn} = \frac{16IB}{\pi}$ . Взяв необходимые производные и подставив в (4), находим выражения для коэффициентов  $c_{mn}$  и записываем решение:

$$u(x,y,t) = \frac{16BL^2}{\pi^4 \gamma} \exp(2i\omega t) \sum_{m,n} \frac{\exp(-i\phi_{ml}) \sin \frac{\pi mx}{L} \sin \frac{\pi ny}{L}}{mn(m^2 + n^2)(1 + Z_{mn}^2)^{1/2}}, \quad (6)$$

$$Z_{mn} = \frac{2\omega L^2}{\pi^2 I \gamma (m^2 + n^2)}, \quad \text{tg } \phi_{ml} = Z_{mn}, \quad m, n = 1, 3, 5, \dots$$

Внутреннее трение найдем по формуле [1]

$$Q^{-1} = \frac{\Delta W}{2\pi W}, \quad (7)$$

где  $W = \frac{\sigma_0^2 V}{2E_m}$  – максимальная упругая энергия, запасенная в объеме зерна  $V$ ,  $E_m^{-1} = 0,5(E_1^{-1} + E_2^{-1})$ ,  $E_m$  – средняя величина модуля Юнга,  $\Delta W$  – энергия, рассеянная за период колебаний приложенного напряжения:

$$\Delta W = \int_0^{\frac{\pi}{\omega}} \text{Re}(f_1(t)) \int_0^L dx \int_0^L dy \text{Re} \left( \frac{du(x,y,t)}{dt} \right) dt. \quad (8)$$

В выражении (8)  $\text{Re}$  означает действительную часть комплексной величины.

Взяв производную по времени от (6), воспользовавшись (2) и (7), после вычисления интегралов (8), находим

$$Q^{-1} = \frac{\beta \sigma_0^2 L}{2\pi^6 \gamma E_0} \sum_{m,n} \frac{1}{(mn)^2 (m^2 + n^2)} \frac{\omega \tau_{mn}}{1 + (\omega \tau_{mn})^2}, \quad (9)$$

где  $E_0 = \frac{E_1 E_2 (E_1 + E_2)}{2(E_1 - E_2)^2}$ ,  $\tau_{mn} = \frac{2L^2}{I \gamma \pi^2 (m^2 + n^2)}$ .

В выражении (9) принято, что размер рассматриваемого сегмента  $L$  примерно равен размеру зерна, поэтому его объем  $V \approx L^3$ , а геометрический множитель  $\beta \sim 1$  учитывает реальную форму зерен, долю мигрирующей границы от общей ее площади, а также ориентацию сегментов границ по отношению к внешнему напряжению.

### 3. Обсуждение результатов

Под действием приложенного к системе кристаллит-граница-кристаллит нормального к границе переменного напряжения происходит периодическое смещение границы путем ее миграции. Это связано с

рассеянием энергии колебаний, что называется внутренним трением. Величина внутреннего трения является амплитудно зависимым и дается выражением (9). Согласно (9) спектр внутреннего трения состоит из налагающихся друг на друга дебаевских пиков с временами релаксации  $\tau_{mn}$ , зависящими от размеров сегмента границы, ограниченного тройными стыками, и миграционной подвижности границы. Времена релаксации определяются двойными индексами и убывают по мере их увеличения в единицах  $\tau_0 = L^2 / (I\gamma\pi^2)$  как числа 1 ( $\tau_{11}$ ), 0,2 ( $\tau_{13}$  и  $\tau_{31}$ ), 0,11 ( $\tau_{33}$ ), 0,077 ( $\tau_{15}$  и  $\tau_{51}$ ) и т.д. Величины максимумов, отвечающие этим значениям времен релаксации, убывают еще быстрее, согласно (9). Их величины в единицах  $Q_0^{-1} = \beta L \sigma_0^2 / (8\pi^6 \gamma E_0)$  с учетом кратности некоторых значений  $\tau$  составляют соответственно последовательность чисел 1, 0,044, 0,0028, 0,0062 и т.д. Главный вклад дает максимум при  $n = m = 1$ . Спектр внутреннего трения показан на рис. 1. На горизонтальной оси откладывается значение времени релаксации, а высота отрезков пропорциональна вкладу во внутреннее трение соответствующего слагаемого. Их высота по отношению к главному максимуму обозначена числами рядом с отрезками.

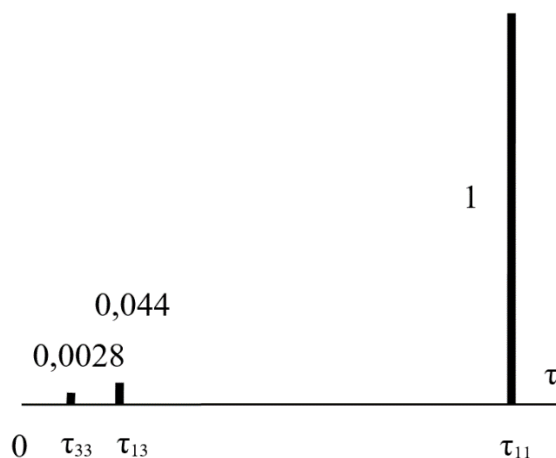


Рис. 1. Спектр внутреннего трения на мигрирующей границе.

Результирующий пик внутреннего трения оказывается шире дебаевского, что характерно и для других зернограницных пиков, обусловленных межзеренным проскальзыванием. Ширина таких пиков, полученная в экспериментах, всегда больше пика Дебая. Это связывают с различными факторами [17, 18]. Среди них зависимость эффективной вязкости границ от их атомного строения, разброс геометрических размеров подвижных участков границ, наличие некоторого распределения времен релаксации, нелинейность в зависимости скорости проскальзывания от приложенного напряжения и др. Все перечисленные

факторы имеют место и в случае релаксационных процессов на мигрирующих границах.

Наблюдается некоторая аналогия в релаксационных свойствах границ зерен в случаях их миграции и межзеренного проскальзывания. Время релаксации в этих процессах даются соответственно выражениями  $\tau_m = \frac{L^2}{I\gamma\pi^2}$  и  $\tau_s = \frac{(1-\nu)\pi L}{2GI_s}$  [19]. Первое выражение получено из (9) при  $n = m = 1$ . Во втором выражении  $\nu$  – коэффициент Пуассона,  $I_s$  – подвижность системы по отношению к зернограничному проскальзыванию,  $G$  – модуль сдвига. Величина  $L$  в обоих случаях соответствует размеру сегмента границы между тройными стыками. Величины подвижностей  $I$  и  $I_s$  в обоих случаях пропорциональны зернограничному коэффициенту диффузии [14, 19].

$$I = \frac{C_0^2 \delta D}{\pi a^2 w_2 \ln\left(\frac{4a}{C_0 \delta}\right) kT}, \quad I_s = \frac{2C_0 \Omega^2 \delta D}{kT d^2}. \quad (10)$$

Здесь  $C_0$  – равновесная концентрация вакансий в границе,  $\delta$  – диффузионная толщина границы,  $D = D_0 \exp(-U_m/kT)$  – зернограничный коэффициент диффузии вакансий,  $D_0$  – предэкспоненциальный фактор,  $U_m$  – энергия миграции вакансий,  $a$  – период решетки зерен,  $d \sim a$  – размер неоднородностей в границе,  $w_2$  – вероятность попадания в основную область двух атомов [14].

Поэтому энергии активации в обоих процессах  $U_m$  близки по величине или совпадают. Различие может быть обусловлено атомным строением границы.

#### **4. Заключение**

Анизотропия упругих модулей, сопрягающихся вдоль общей границы кристаллитов при определенной ориентации действующих напряжений, может являться причиной возникновения движущей силы миграции границы. Такая сила в случае переменного напряжения приводит к периодической миграции границы.

Предложена модель внутреннего трения для сегмента границы, ограниченного тройными стыками зерен. Времена релаксации представляет серию убывающих величин. С каждым таким временем связано наличие пика внутреннего трения дебаевского типа различной высоты. Полный максимум образован наложением таких пиков. В результате общий максимум имеет ширину, превышающую ширину пика Дебая.

Приведенная модель описывает внутреннее трение в поликристаллических металлах с наномасштабным размером зерна. Металлы с обычными зёрнами имеют малую относительную долю атомов, принадлежащих зернограничной области. Смещения границы в обоих случаях за время одного периода колебаний сопоставимы, но в первом случае они сравнимы с размером зерна, поэтому величина внутреннего трения экспериментально достаточно легко измерима в отличие от металлов с обычным размером зерна.

#### **Библиографический список:**

1. **Новик, А.** Релаксационные явления в кристаллах / А. Новик, Б. Берри. – М.: Атомиздат, 1975. – 472 с.
2. **Blanter, M.S.** Internal friction in metallic materials / M.S. Blanter, I.S. Golovin, H. Neuhäuser, H.-R. Sinning. – Heidelberg: Springer Berlin, 2007. – 542 p. DOI: 10.1007/978-3-540-68758-0.
3. **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. 196-202. DOI: 10.21883/JTF.2022.02.52013.146-21.
4. **Мулюков, Р.Р.** Сверхпластичность ультрамелкозернистых сплавов: Эксперимент, теория, технологии / Р.Р. Мулюков, Р.М. Имаев, А.А. Назаров и др. – М.: Наука, 2014. – 284 с.
5. Гусев, А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А.И. Гусев. – М.: Физматлит, 2005. – 416 с.
6. **Kê, T.S.** Experimental evidence of the viscous behavior of grain boundaries in metals / T.S. Kê // Physical Review. – 1947. – V. 71. – I. 8. – P. 533-546. DOI: 10.1103/PhysRev.71.533.
7. **Ханнанов, Ш.Х.** Стесненное зернограничное проскальзывание и неупругость поликристаллов / Ш.Х. Ханнанов, С.П. Никаноров // Журнал технической физики. – 2006. – Т. 76. – Вып. 1. – С. 54-59.
8. **Кульков, В.Г.** Диффузионная модель внутреннего трения в нанокристаллическом материале // Журнал технической физики. – 2007. – Т. 77. – № 3. – С. 43-48.
9. **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.
10. **Кульков, В.Г.** Вклад зернограничных пор в высокотемпературный фон внутреннего трения в металлах с ультрамелким зерном / В.Г. Кульков // Известия РАН. Серия физическая. – 2020. – Т. 84. – № 9. – С. 1232-1235. DOI: 10.31857/S0367676520090227.
11. **Gottstein, G.** Grain boundary migration in metals: thermodynamics, kinetics, applications / G. Gottstein, L.S. Shvindlerman. – Boca Raton, FL: CRC Press, 2010. – 674 p. DOI: 10.1201/9781420054361.
12. **Чувильдеев, В.Н.** Неравновесные границы зерен в металлах. Теория и приложения / В.Н. Чувильдеев. – М.: Физматлит, 2004. – 304 с.
13. **Орлов, А.Н.** Границы зерен в металлах / А.Н. Орлов, В.Н. Перевезенцев, В.В. Рыбин. – М.: Металлургия, 1980. – 154 с.
14. **Kul'kov, V.G.** Migration of an incommensurate high-angle grain boundary / V.G. Kul'kov, A.S. Polyakov // Russian Metallurgy (Metally). – 2012. – V. 4. – P. 263-268. DOI: 10.1134/S0036029512040064.
15. **Günster, C.** Migration of grain boundaries in Zn / C. Günster, D.A. Molotov, G. Gottstein // Acta Materialia. – 2013. – V. 61. – I. 7. – P. 2363-2375. DOI: 10.1016/j.actamat.2013.01.007.
16. **Illgen, G.** Thermal stability of SPD-processed aluminum alloys – Internal friction as an indication for recovery, recrystallization and abnormal grain growth / G. Illgen, B. Bohne, M.F.-X. Wagner, Ph. Frint // Journal of Materials Research and Technology. – 2022. – V. 17. – P. 1752-1759. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.01.149.
17. **Кульков, В.Г.** Внутреннее трение на границах зерен с нелинейной вязкостью / В.Г. Кульков // Металлы. – 2005. – № 4. – С. 69-73.
18. **Головин, И.С.** Зернограничная релаксация в меди до и после равноканального углового прессования и рекристаллизации / И.С. Головин // Физика металлов и металловедение. – 2010. – Т. 110. – № 4. – С. 424-432.
19. **Кульков, В.Г.** Межзеренное скольжение по границе с уступами / В.Г. Кульков // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2005. – № 8. – С. 84-87.

**References:**

1. 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.
2. Blanter M.S. Golovin I.S., Neuhäuser H., Sinning H.-R. *Internal friction in metallic materials*, Springer Berlin, Heidelberg, 2007, 542 p. DOI: 10.1007/978-3-540-68758-0.
3. Gridnev S.A., Kalinin Y.E. O vakansionnoj prirode vysokotemperaturnogo fona vnutrennego treniya v tverdykh telakh [On the vacancy nature of the high-temperature background of internal friction in solids], *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki [Technical Physics]*, 2022, vol. 92, issue 2, pp. 196-202. DOI: 10.21883/JTF.2022.02.52013.146-21. (In Russian).
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. Gusev A.I. *Nanomaterialy, nanostruktury, nanotekhnologii* [Nanomaterials, nanostructures, nanotechnologies], Moscow, Fizmatlit Publ., 2005, 416 p. (In Russian).
6. Kê T.S. Experimental evidence of the viscous behavior of grain boundaries in metals, *Physical Review*, 1947, vol. 71, issue 8, pp. 533-546. DOI: 10.1103/PhysRev.71.533.
7. Khannanov Sh.Kh., Nikanorov S.P. Constrained grain-boundary sliding and inelasticity of polycrystals, *Technical Physics*, 2006, vol. 51, issue 1, pp. 52-56. DOI: 10.1134/S1063784206010087.
8. Kul'kov V.G. Diffusion model of internal friction in nanocrystalline materials, *Technical Physics*, 2007, vol. 52, no. 3, pp. 333-338. DOI: 10.1134/S1063784207030085.
9. 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.
10. Kul'kov V.G. Contribution of grain boundary pores to the high-temperature background of internal friction in metals with ultrafine grain, *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2020, vol. 84, issue 9, pp. 1043-1047. DOI: 10.3103/S1062873820090221.
11. Gottstein G., Shvindlerman L.S. *Grain Boundary Migration in Metals: Thermodynamics, Kinetics, Applications*, Boca Raton FL, CRC Press Publ., 2010, 674 p. DOI: 10.1201/9781420054361.
12. 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).
13. Orlov A.N., Perevezentsev V.N., Rybin V.V. *Granitsy zeren v metallakh [Grain boundaries in metals]*, Moscow, Metallurgiya Publ., 1980, 154 p. (In Russian).
14. Kul'kov V.G., Polyakov A.S. Migration of an incommensurate high-angle grain boundary, *Russian Metallurgy (Metally)*, 2012, no. 4, pp. 263-268. DOI: 10.1134/S0036029512040064.
15. Günster C., Molotov D.A., Gottstein G. Migration of grain boundaries in Zn, *Acta Materialia*, 2013, vol. 61, issue 7, pp. 2363-2375. DOI: 10.1016/j.actamat.2013.01.007.
16. Illgen G., Bohne B., Wagner M.F.-X., Frint Ph. Thermal stability of SPD-processed aluminum alloys – Internal friction as an indication for recovery, recrystallization and abnormal grain growth, *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, vol. 17, pp. 1752-1759. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.01.149.
17. Kul'kov V.G. Internal friction at grain boundaries with nonlinear viscosity, *Russian Metallurgy (Metally)*, 2005, no. 4, pp. 346-349.
18. Golovin I.S. Grain-boundary relaxation in copper before and after equal-channel angular pressing and recrystallization, *The Physics of Metals and Metallography*, 2010, vol. 110, issue 4, pp. 405-413. DOI: 10.1134/S0031918X10100121.
19. Kul'kov V.G. Mezherennoe skol'zhenie po granitse s ustupami [Intergrain sliding along the boundary with ledges], *Poverkhnost'. Rentgenovskie, Sinkhrotronnye i Neitronnye Issledovaniya [Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques]*, 2005, issue 8, pp. 84-87. (In Russian).

*Original paper*

**INTERNAL FRICTION CAUSED BY MIGRATION OF THE INTERCRYSTALLINE  
BOUNDARY IN THE METAL**

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/2022.14.159

**Abstract:** The model of internal friction at the migrating intercrystalline boundary is considered. Under the action of an alternating external stress oriented normally to the boundary, compression and



stretching of the mating crystallites occurs. Due to their anisotropy and mutual reversal, Young's modules in the direction of the stress action are different. The volume density of elastic energy in crystallites is different. This leads to the emergence of an effective driving force for boundary migration. As a model, a square segment of the boundary is selected, fixed along the perimeter by triple grain joints. The Laplace stress from the side of the curved boundary is counteracting. The differential equation of the connection of the boundary displacement with the total voltage is solved by the Fourier method. Based on this solution, the internal friction is calculated. The relaxation time spectrum consists of a series of lines. Each of them corresponds to the peak of Debye. The main peak has a significant value, smaller peaks are superimposed on it. The resulting maximum of internal friction widens in comparison with the Debye peak.

*Keywords: driving force, migration of the intercrystalline boundary, peak of internal friction, relaxation time.*

*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: 15.02.2022; после рецензирования/revise: 4.03.2022; принята/accepted 10.03.2022.