УДК 539.67 *Оригинальная статья*

Оценка параметров неравновесных границ зерен из высокотемпературного фона зернограничного внутреннего трения

В.Г. Кульков, Д.Ш. Норов

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/2025.17.267

Аннотация: Рассматриваются физические процессы, приводящие к образованию неравновесных границ зерен в нанокристаллических и ультрамелкозернистых материалах. Решается задача для двумерного уравнения диффузии на сегменте границы, подверженном действию переменных сжимающих напряжений. Находится распределение вакансий и соответствующее нормальное напряжение на сегменте. Из рассмотрения динамики вакансий находится скорость взаимного смещения зерен в направлении нормали к границе и величина внутреннего трения. Внутреннее трение имеет характер высокотемпературного фона. Учитывается эффект подстройки напряжений. Обсуждается процесс атомной релаксации структуры границы с течением времени. Показывается изменение энергии релаксации с изменением комплексного параметра, включающего частоту, размер зерна, энергию активации и температуру. Из графика зависимости логарифма величины произведения внутреннего трения на температуру от обратной температуры находятся энергии активации на высоко- и низкотемпературных частях процесса. Показывается, что при предплавильных температурах возможно появление участков с наиболее высокой энергией активации. Рассматривается способ определения энергии активации внутреннего трения на равновесных и неравновесных границах. Обсуждается метод оценки размера зерна. Из изменения величины внутреннего трения с течением времени можно определить время релаксации атомной структуры границы.

Ключевые слова: нанокристаллические и ультрамелкозернистые материалы, диффузия, внутреннее трение, энергия активации, время релаксации.

Кульков Виктор Геннадьевич – д.ф.-м.н., профессор филиала ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Московский Энергетический Институт» в городе Волжском
Норов Джонибек Шералиевич– старший преподаватель филиала ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Московский Энергетический Институт» в городе Волжском

Original paper

Estimation of the parameters of nonequilibrium grain boundaries from the high-temperature background of grain boundary internal friction

V.G. Kulkov, D.Sh. Norov

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

DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.267

Abstract: The physical processes leading to the formation of nonequilibrium grain boundaries in nanocrystalline and ultrafine-grained materials are considered. The problem is solved for a two-dimensional diffusion equation on a boundary segment exposed to variable compressive stresses. The vacancy distribution and the corresponding normal tension in the segment are found. From the consideration of vacancy dynamics, the rate of mutual displacement of grains in the normal to the boundary direction and the amount of internal friction are determined. Internal friction has the character of a high-temperature background. The effect of stress adjustment is taken into account. The process of atomic relaxation of the boundary structure over time is discussed. The change in relaxation energy is shown with a change in a complex parameter, including frequency, grain size, activation energy, and temperature. From the graph of the dependence of the logarithm of the product of internal friction on temperature on the reverse temperature, the activation energies on the high- and low-

© В.Г. Кульков, Д.Ш. Норов, 2025

temperature parts of the process are found. It is shown that at pre-melting temperatures, areas with the highest activation energy may appear. A method for determining the activation energy of internal friction at equilibrium and nonequilibrium boundaries is considered. The method of grain size estimation is discussed. The relaxation time of the atomic structure of the boundary can be determined from the change in the amount of internal friction over time.
Keywords: nanocrystalline and ultrafine-grained materials, diffusion, internal friction, activation energy, relaxation time.

Viktor G. Kul'kov – Dr. Sc., Professor, Branch of the National Research University «Moscow Power Engineering Institute» in Volzhsky ORCID: 0000-0001-8449-026X
Dzhonibek Sh. Norov – Senior Lecturer, Branch of the National Research University «Moscow Power Engineering Institute» in Volzhsky ORCID: 0000-0003-1320-5702

Поступила в редакцию/received: 10.06.2025; после рецензирования/revised: 01.07.2025; принята/accepted: 03.07.2025.

1. Введение

Нанокристаллические материалы характеризуются кроме малого размера зерна также и диффузионными свойствами разделяющих их границ. Причем эти свойства существенно зависят от способа получения таких материалов [1]. В работах [2-4] отмечалось, что коэффициенты зернограничной самодиффузии и диффузии примесных атомов существенно отличались от подобных величин в материалах с обычными размерами зерен. Одним из методов получения материалов с ультрамелким зерном является интенсивная пластическая деформация [1, 2, 5]. В этом процессе происходит образование деформационных вакансий в объеме зерна и на его границах до концентраций, превосходящих равновесную при данной температуре. Кроме того, измельчение зерна сопровождается образованием и захватом границами избыточных дислокаций [4]. Область границ зерен переходит в термодинамически неравновесное состояние. Оно характеризуется как избыточной концентрацией дефектов, так и наличием дальнодействующих напряжений. Такое состояние в процессе отдыха стремится к равновесию путем модификации атомного строения границ [6]. Время релаксации определяется температурой образца. Неравновесное состояние границ характеризуется повышенной концентрацией свободного объема, зернограничных дислокаций и дисклинаций [7]. Несмотря на то, что объем материала зернограничной фазы при уменьшении размера зерна увеличивается и доходит до величин ~50% при размере зерен около 10 нм, экспериментальные исследования величины накопленного свободного объема в границах встречает ряд серьезных трудностей.

Одним из наиболее эффективных способов исследования диффузионных параметров поверхностей раздела в твердом теле является метод внутреннего трения [8]. Такие факторы как скорость диффузионного переноса вещества, энергия активации атомных перестроек, время релаксации структуры границ непосредственно связаны с основными

параметрами температурной зависимости внутреннего трения.

Целью настоящей работы является разработка диффузионной модели зернограничного внутреннего трения в материалах ультрамелким и наномасштабным размером зерна с целью получения параметров неравновесности структуры границ зерен.

2. Описание модели

Рассмотрим плоский квадратный участок границы, ограниченный со всех сторон тройными стыками зерен. В них могут находиться протяженные поры. Причинами появления пор в тройных стыках нанозерен могут быть следующие:

- происходит «фиксация» плотности жидкой фазы на стыке трех фронтов кристаллизации зерен, что приводит к концентрации избыточного свободного объема в тройном соединении после затвердевания [9, 10];
- из-за несоответствия механических свойств, вызванного разницей в ориентациях кристаллических решеток между тремя зернами, тройное соединение обычно подвергается высокой концентрации напряжений, что и приводит к образованию микропор [11];
- нанопоры зарождаются из-за скольжения по границам зерен, которое не поддается аккомодации при сравнительно низкой температуре и эффективно аккомодируется процессом зернограничной диффузии при повышенной температуре [12];
- образование полос скольжения в условиях усталостного нагружения нередко приводит к появлению пор в тройных стыках [13];
- возможность диффузионного зарождения нанопор в области тройных стыков зерен, содержащих отрицательные клиновые дисклинации деформационного происхождения, генерирующие в окрестности тройных стыков высокие растягивающие напряжения и высокая избыточная концентрация вакансий [14]. Можно рассмотреть участки, ограниченные порами по всему периметру, либо по его части. В последнем случае тройной стык является частично сплошным.

Плоский участок подвержен действию переменных нормальных напряжений амплитуды σ_0 и частоты ω. Рассмотрим один такой сегмент границы размера L, ограниченный со всех сторон протяженными порами. Координатные оси выберем в плоскости границы параллельно сторонам, а начало совместим с одной из вершин. В приближении $D_b\delta >> D_v L$ можно пренебречь потоком вакансий в объём зёрен по сравнению с граничными потоками. Здесь D_b и D_v – зернограничный и объемный коэффициенты диффузии, δ – диффузионная толщина границы.

Для избыточной концентрации вакансий на фрагменте $C(x,y,t) = C_i(x,y,t) - C_0$ можно записать неоднородное уравнение диффузии:

$$\frac{\partial C(x,y,t)}{\partial t} = D_b\left(\frac{\partial^2 C(x,y,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C(x,y,t)}{\partial y^2}\right) + A\exp(i\omega t), \quad (1)$$

с граничными условиями $C(0,y,t) = C(L,y,t) = C(x,0,t) = C(x,L,t) = 0$. Здесь $C_i(x,y,t)$ – истинная и C_0 – равновесная концентрации вакансий. Последнее слагаемое в (1) – плотность источников вакансий, которым является граница под действием напряжений. Решая уравнение (1) и учитывая связь напряжения с концентрацией вакансий $\sigma_\perp(x,y,t) = \frac{C(x,y,t)kT}{C_0\Omega}$, находим распределение напряжений на сегменте:

$$\sigma_\perp(x,y,t) = \frac{16AL^2kT}{\pi^4 D_b C_{0b}\Omega}\exp(i\omega t)\sum_{m,n}\frac{\exp(-i\phi_{mn})\sin\frac{\pi m x}{L}\sin\frac{\pi n y}{L}}{mn\left(\left(m^2+n^2\right)^2+Z^2\right)^{1/2}}, \quad (2)$$

где $Z = \frac{\omega L^2}{\pi^2 D_b}$, $\operatorname{tg}\phi_{mn} = \frac{\omega L^2}{D_b\pi^2\left(m^2+n^2\right)}$, m и n принимают значения 1, 3, 5, ...

Величину A найдем из равенства модулей полной растягивающей силы, действующей со стороны внешнего напряжения на сегмент, и силы, определяемой из выражения (2): $\left(1/L^2\right)\int_S \sigma_\perp(x,y,t)\,dS = \sigma(t)$. Тем самым будет учтен так называемый эффект подстройки напряжений. Это даёт:

$$A = \frac{\pi^6 D_b\sigma_0 C_0\Omega}{64L^2kT}\Sigma_0^{-1/2}, \quad (3)$$

где $\Sigma_0 = \left[\left(\sum_{m,n}\frac{m^2+n^2}{m^2n^2\left(\left(m^2+n^2\right)^2+Z^2\right)}\right)^2 + \left(\sum_{m,n}\frac{Z}{m^2n^2\left(\left(m^2+n^2\right)^2+Z^2\right)}\right)^2\right]$.

Скорость взаимного движения зерен по направлению нормали к границе определяется суммарным потоком вакансий J через периметр сегмента:

$$J = D_b\delta\left[\int_0^L\left(\partial C(x,0,t)/\partial y - \partial C(x,L,t)/\partial y\right)dx + \int_0^L\left(\partial C(0,y,t)/\partial x - \partial C(L,y,t)/\partial x\right)dy\right]. \quad (4)$$

Из (4) для скорости получаем выражение:

$$v_n(t) = 2\Omega\delta A\exp(i\omega t) - i\left(2\omega\Omega\delta/L^2\right)\int_S C_b'(x,y,t)\,dS. \quad (5)$$

Внутренне трение [15] от одного сегмента равно $Q_1^{-1} = \Delta W_1/2\pi W$, где в числителе стоит энергия, рассеянная за один период $\Delta W_1 = \int_S\int_0^{T_0}\operatorname{Re}(\sigma(x,y,t))\operatorname{Re}(\upsilon(t))\,dtds$, а в знаменателе – максимальная энергия упругой деформации $W = V_0\sigma_0^2/2E$. Здесь Re обозначает действительную часть комплексной величины, $V_0 = L^3$ – объем зерна, E – модуль Юнга.

Подставляя все найденные величины в выражение для Q^{-1}, получим:

$$Q_0^{-1} = \frac{\pi^4 \theta C_0 \Omega^2 \delta E}{32kTL} F(Z),\ F(Z) = \frac{1}{Z \cdot \Sigma_0} \sum_{m,n} \frac{m^2 + n^2}{(m \cdot n)^2 \left(\left(m^2 + n^2 \right)^2 + Z^2 \right)}. \quad (6)$$

Множитель $\theta \sim 1$ определяет долю принадлежности границы зерен с нужной ориентацией объему зерен.

3. Обсуждение результатов

Выражение (6) описывает так называемую фоновую составляющую зернограничного внутреннего трения. Структурное состояние границ зерен зависит от температуры и способа приготовления образца. Как отмечено выше, сразу при получении образца состояние границ является неравновесным. Одним из проявлений неравновесности служит избыточный свободный объем и обусловленный им повышенный коэффициент самодиффузии. Зависимость $F(Z)$ от параметра Z представлена на рис. 1 а. Параметр Z зависит от температуры, частоты, энергии активации и предэкспоненциального множителя коэффициента диффузии вакансий. Как видно из рис. 1 а, график зависимости представляет собой два прямолинейных участка с переходной между ними областью. При одинаковой частоте параметр Z зависит от независимых переменных, таких как размера зерен, энергии активации и температуры. Подобное поведение фона внутреннего трения отмечалось и ранее в системах с ограниченным размером диффузионных участков [16, 17].

Исходя из выражения $Z = \omega L^2 / \pi^2 D_b$, можно построить зависимость $Q^{-1}T$ от обратной температуры. Подставляем в это выражение значение энергии активации диффузии $U_n = U_e - \Delta U$ неравновесных границ в зависимости от времени t [18]:

$$D_b = D_b^e \exp(\Delta U / kT),\ \Delta U = \Delta U_0 \exp\left(- t / t_0 \right), \quad (7)$$

где D_b^e – коэффициент диффузии равновесной границы, ΔU – избыточная энергия неравновесной границы в расчете на один атом, t_0 – время релаксации структуры границы $t_0 \approx \dfrac{d^3 kT}{200 \delta D_b^e G V_0}$. Здесь G – модуль сдвига. Подстановка последних выражений в Z дает

$$\lg Z = \lg \frac{\omega L^2}{\pi^2 D_0} + \frac{\alpha U_0}{kT} - \frac{\alpha \Delta U_0}{kT} \exp\left(- t / t_0 \right), \quad (8)$$

где D_0 – предэкспоненциальный множитель в выражении зернограничного коэффициента диффузии вакансий, который будем считать одинаковым для равновесных и неравновесных границ, $\alpha = \lg e = 0{,}434$. Зависимость $Q^{-1}T$ от обратной температуры и времени имеет сложный характер. В

начальный момент времени наклон прямолинейных участков определяется энергией активации неравновесной границы. В результате релаксации структуры границ с течением времени этот наклон меняется до значений, характерных для равновесных границ.

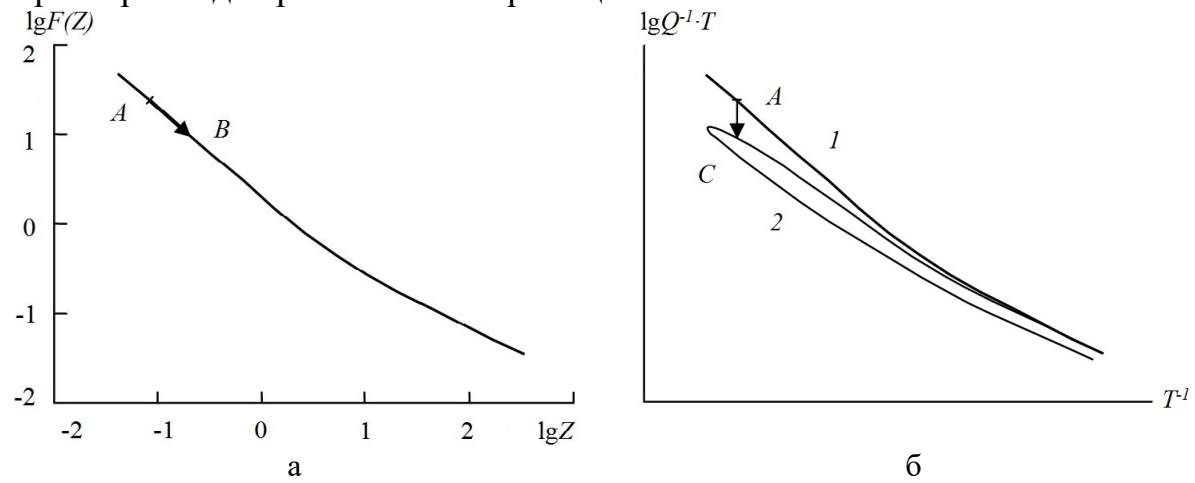

Рис. 1. Зависимость $\lg F(Z)$ от величины $\lg Z$ а), и $\lg Q^{-1} \cdot T$ от T^{-1} б). Стрелками показан процесс релаксации атомной структуры границы.

Если время релаксации t_0 велико в сравнении с длительностью эксперимента, то наклон прямолинейных участков не успевает измениться, и мы можем оценить энергию активации неравновесной границы. В случае, если время релаксации мало, и сравнимо или меньше длительности эксперимента, то характер зависимости последнего от обратной температуры отклоняется от прямолинейных участков. В результате при возвращении к исходной температуре величина внутреннего трения не совпадает с исходной. Иллюстрацией этого случая служит рис. 1 б, на котором качественно изображено изменение внутреннего трения в течение эксперимента. Здесь представлена зависимость $Q^{-1} \cdot T$ от T^{-1}. Номерами *1* и *2* обозначены кривые для границ неравновесной структуры и на пути к равновесию. В процессе нагрева граница частично релаксирует, что изменяет значение Z, как показано стрелкой на рис. 1 а. Точкой A показано значение внутреннего трения нерелаксированной границы, а B – с частичной релаксацией. В этом процессе изменяется энергия активации, возможен некоторый рост размера зерна, но температура и частота остаются неизменными. В процессе релаксации структуры границ уменьшается величина избыточного свободного объема, что увеличивает энергию активации диффузии вакансий, а это уменьшает значение внутреннего трения, как показано на рис. 1 б отрезком AC. Релаксация может происходить в процессе измерения, поэтому прямая и обратная ветви кривой не совпадают. Тангенс угла наклона на рис. 1 а в области высоких и низких температур соотносятся как числа 1 и 0,5.

Таким образом, измеряя угол наклона прямолинейных участков

графика можно оценить энергию активации внутреннего трения границ в неравновесном и равновесном состояниях. В случае высоких температур на графике рис. 1 а может появиться и третий излом, если концентрация тепловых вакансий превысит концентрацию вакансий неравновесной структуры границы. Тогда энергия активации внутреннего трения включает не только энергию миграции вакансий, но и энергию их образования, что совпадает с энергией самодиффузии атомов в границе.

Смена прямолинейных участков обусловлена распространением диффузионной длины вакансий на весь сегмент границы L. В этом случае за время половины периода $T_0/2$ диффузионная длина достигает значения $L/2$. Тогда $L/2 = \sqrt{D_b T_0/2} = \sqrt{\pi D_b/\omega}$. Релаксация границы увеличивает значение Z_0, при котором происходит смена прямолинейных участков. Действительно, возможный рост зерна пропорционален L^2, а коэффициент диффузии зависит от энергии активации экспоненциально. На значительное изменение энергии активации диффузии указывалось неоднократно [19-21]. Наблюдение за изменением внутреннего трения в течение времени, сравнимым или превышающем время релаксации структуры границы, можно оценить время ее релаксации t_0.

4. Заключение

Изучая внутреннее трение на неравновесных границах зерен, можно получить ряд сведений о границах. В частности, измеряя углы наклона прямолинейных участков при низких и высоких температурах можно определить энергии активации внутреннего трения на неравновесных и после релаксации на равновесных границах зерен. В тоже время из положения точки излома прямолинейных участков можно оценить размер зерна кристаллической структуры. Наблюдая за изменением неравновесных свойств образца, можно оценить время релаксации структуры его границ t_0.

Библиографический список:

1. **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.
2. **Валиев, Р.З.** Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией / Р.З. Валиев, И.В. Александров – М.: Логос, 2000. – 272 с.
3. **Грабовецкая, Г.П.** Зернограничная диффузия никеля в субмикрокристаллическом молибдене, полученном интенсивной пластической деформацией / Г.П. Грабовецкая, И.П. Мишин, И.В. Раточка, С.Г. Псахье, Ю.Р. Колобов // Письма в журнал технической физики. – 2008. – Т. 34. – Вып. 4. – С. 1-7.
4. **Чувильдеев, В.Н.** Неравновесные границы зерен в металлах. Теория и приложения / В.Н. Чувильдеев. – М.: Физматлит, 2004. – 304 с.
5. **Гусев, А.И.** Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А.И. Гусев. – М.: Физматлит, 2005. – 416 с.
6. **Попов, В.В.** Эмиссионная мессбауэровская спектроскопия границ зерен ультрамелкозернистого ниобия, полученного интенсивной пластической деформацией / В.В. Попов, Е.В. Осинников,

Р.М. Фалахутдинов // Физика металлов и металловедение. – 2022. – Т. 123. – Вып. 8. – С. 881-887. DOI: 10.31857/S001532302208006X.
7. **Petkov, M.P.** Evaluation of local stress state due to grain-boundary sliding during creep within a crystal plasticity finite element multi-scale framework / M.P. Petkov, E. Elmukashfi, E. Tarleton, A. Cocks // International Journal of Mechanical Sciences. – 2021. – V. 211. – Art. № 106715. – 20 p. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2021.106715.
8. **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.
9. **Poletaev, G.M.** Modeling the formation of free volume at grain boundaries and triple junctions during nickel crystallization / G.M. Poletaev, D.V. Novoselova, R.Yu. Rakitin, A.S. Semenov // Letters on Materials. – 2020. – V. 10. – № 3. – P. 299-302. DOI: 10.22226/2410-3535-2020-3-299-302.
10. **Полетаев, Г.М.** Компьютерное моделирование атомной структуры тройных стыков границ наклона в ГЦК металлах / Г.М. Полетаев, Д.В. Дмитриенко, В.В. Дябденков, В.Р. Микрюков, М.Д. Старостенков // Вестник алтайской науки. – 2013. – Вып. 1. – С. 225-230.
11. **Zhang, X.** Atomic scale analysis of cracking behavior at the triple junctions based on molecular dynamics simulations / X. Zhang, P. Li, Y. Liu, M. Zhang, F. Yang // Engineering Fracture Mechanics. – 2025. – V. 314. – Art. № 110762. – 12 p. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2024.110762.
12. **Wang, L.** Effects of accommodated grain boundary sliding on triple junction nanovoid nucleation in nanocrystalline materials / L. Wang, J. Zhou, S. Zhang, Y. Liu, Sh. Dong // Mechanics of Materials. – 2014. – V. 71. – P. 10-20. DOI: 10.1016/j.mechmat.2014.01.002.
13. **Li, K.** Creep-fatigue damage mechanisms and life prediction based on crystal plasticity combined with grain boundary cavity model in a nickel-based superalloy at 650°C / K. Li, R. Wang, X. Zhang, Sh. Tu // International Journal of Plasticity. – 2023. – V. 165. – Art. № 103601. – 25 p. DOI: 10.1016/j.ijplas.2023.103601.
14. **Пупынин, А.С.** Диффузионное зарождение пор в стыках зерен субмикрокристаллических материалов / А.С. Пупынин, С.В. Кириков, В.Н. Перевезенцев // Проблемы прочности и пластичности. – 2021. – Т. 83. – Вып. 3. – С. 276-284. DOI: 10.32326/1814-9146-2021-83-3-276-284.
15. **Новик, А.** Релаксационные явления в кристаллах / А. Новик, Б. Берри. – М.: Атомиздат, 1975. – 472 с.
16. **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.
17. **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
18. **Назаров, А.А.** Зернограничная диффузия в нанокристаллах при зависящем от времени коэффициенте диффузии // Физика твердого тела. – 2003. – Т. 45. – Вып. 6. – С. 1112-1114.
19. **Кульков, В.Г.** Зернограничный фон внутреннего трения с неконсервативным скольжением / В.Г. Кульков, П.П. Цирульников, А.А. Сыщиков // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2018. – Т. 15. – Вып. 3. – С. 397-402. DOI: 10.25712/ASTU.1811-1416.2018.03.014.
20. **Кульков, В.Г.** Вклад зернограничных пор в высокотемпературный фон внутреннего трения в металлах с ультрамелким зерном // Известия РАН. Серия физическая. – 2020. – Т. 84. – Вып. 9. – С. 1232-1235. DOI: 10.31857/S0367676520090227.
21. **Даринский, Б.М.** Диффузионная природа α-релаксации в аморфном полимере Т20-60 / Б.М. Даринский, Ю.Е. Калинин, М.А. Каширин и др. // Журнал технической физики. – 2025. – Т. 95. – Вып. 1. – С. 45-55. DOI: 10.61011/JTF.2025.01.59461.96-24.

References:

1. 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).
2. Valiev R.Z., Aleksandrov I.V. *Nanostrukturnye materialy, poluchennye intensivnoj plasticheskoj deformatsiej [Nanostructured materials obtained by intensive plastic deformation]*, Moskow, Logos Publ., 2000, 272 p. (In Russian).
3. Grabovetskaya G.P., Mishin I.P., Ratochka I.V., Psakhie S G., Kolobov Yu.R. Grain-boundary diffusion of nickel in submicrocrystalline molybdenum processed by severe plastic deformation, *Technical Physics Letters*, 2008, vol. 34, issue 2, pp. 136-138. DOI: 10.1134/S1063785008020156.
4. 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).

5. Gusev A.I. *Nanomaterialy, nanostruktury, nanotekhnologii [Nanomaterials, nanostructures, nanotechnologies],* Moscow, Fizmatlit Publ., 2005, 416 p. (In Russian).
6. Popov V.V., Osinnikov E.V., Falakhutdinov R.M. Mössbauer emission spectroscopy of grain boundaries in ultrafine-grained niobium obtained by severe plastic deformation, *Physics of Metals and Metallography*, 2022, vol. 123, issue 8, pp. 825-830. DOI: 10.1134/s0031918x22080063.
7. Petkov M.P., Elmukashfi E., Tarleton E., Cocks A. Evaluation of local stress state due to grain-boundary sliding during creep within a crystal plasticity finite element multi-scale framework, *International Journal of Mechanical Sciences*, 2021, vol. 211, art. no. 106715, 20 p. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2021.106715.
8. 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.
9. Poletaev G.M., Novoselova D.V., Rakitin R.Yu., Semenov A.S. Modeling the formation of free volume at grain boundaries and triple junctions during nickel crystallization, *Letters on Materials*, 2020, vol. 10, no. 3, pp. 299-302. DOI: 10.22226/2410-3535-2020-3-299-302.
10. Poletaev G.M., Dmitrienko D.V., Dyabdenkov V.V., Mikryukov V.R., Starostenkov M.D. Komp'yuternoe modelirovanie atomnoj struktury trojnykh stykov granits naklona v GTsK metallakh [Computer simulation of the atomic structure of triple junctions of slope boundaries in FCC metals], *Vestnik Altajskoj nauki [Bulletin of Altai Science]*. 2013. no. 1. pp. 225-230. (In Russian).
11. Zhang X., Li P., Liu Y., Zhang M., Yang F. Atomic scale analysis of cracking behavior at the triple junctions based on molecular dynamics simulations, *Engineering Fracture Mechanics*, 2025, vol. 314, art. no. 110762, 12 p. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2024.110762.
12. Wang Lu, Zhou J., Zhang S., Liu Y., Dong Sh. Effects of accommodated grain boundary sliding on triple junction nanovoid nucleation in nanocrystalline materials, *Mechanics of Materials*, 2014. vol. 71, pp. 10-20. DOI: 10.1016/j.mechmat.2014.01.002.
13. Li K., Wang R., Zhang X., Tu Sh. Creep-fatigue damage mechanisms and life prediction based on crystal plasticity combined with grain boundary cavity model in a nickel-based superalloy at 650°C, *International Journal of Plasticity,* 2023, vol. 165, art. no. 103601, 25 p. DOI: 10.1016/j.ijplas.2023.103601.
14. Pupynin A.S., Kirikov S.V., Perevezencev V.N. Diffuzionnoe zarozhdenie por v stykakh zeren submikrokristallicheskikh materialov [Diffusion nucleation of cavities in grain junctions of submicrocrystalline materials], *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*, 2021, vol. 83, issue 3, pp. 276-284. DOI: 10.32326/1814-9146-2021-83-3-276-284.
15. 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.
16. Kalinin YU.E., Darinskii B.M. Vysokotemperaturnyj fon vnutrennego treniya v tverdykh telakh [High temperature background of internal friction in solids], *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov [Metallurgy and heat treatment of metals],* 2012, no. 5, pp. 15-18. (In Russian).
17. 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
18. Nazarov A.A. Grain-boundary diffusion in nanocrystals with a time-dependent diffusion coefficient, *Physics of the Solid State*, 2003, vol. 45, no. 6, pp. 1166-1169. DOI: 10.1134/1.1583809.
19. Kul'kov V.G., Tsirul'nikov P.P., Syshchikov A.A. Zernogranichnyj fon vnutrennego treniya s nekonservativnym skol'zheniem [Grain boundary background of internal friction with nonconservative sliding], *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedenia [Basic Problems of Material Science]*, 2018, vol. 15, no. 3, pp. 397-402. DOI: 10.25712/ASTU.1811-1416.2018.03.014. (In Russian).
20. 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.
21. Darinskij B.M., Kalinin Yu.E., Kashirin M.A. et al. On the diffusion nature of α-relaxation in the amorphous polymer T20-60, Technical Physics, 2025, vol. 70, no. 1, pp. 41-50. DOI: 10.61011/TP.2025.01.60507.96-24.