

Фон внутреннего трения на межкристаллитных границах общего типа

Ю.В. Гусева

Национальный исследовательский университет "МЭИ", Волжский

Аннотация: Представлены результаты разработки асимптотических выражений для расчета фона внутреннего трения на границах общего типа для предельных случаев частотной зависимости. Математические выражения получены на основе рассмотрения моделей границы, содержащей периодически расположенные ступеньки чередующихся знаков и межкристаллитной границы общего типа, состоящей из параллельных плоских сегментов заданной ширины, разделенных чередующимися ступеньками одинаковой высоты и цилиндрическими порами.

Ключевые слова: модель, граница, фон внутреннего трения, релаксация, температурно-частотная зависимость, скорость проскальзывания.

Реальные конфигурации границ зерен металла позволяют надежно оценивать основные термодинамические параметры границ и рассчитывать их кинетические свойства с учетом диффузионных процессов [1– 3].

Модель межзеренного проскальзывания по границе, сопрягающей плотноупакованную и некристаллографическую плоскости, представлена в работе [4]. На основе решения уравнения диффузии определено влияние геометрии границ различных типов на величину скорости проскальзывания.

В работе [5] рассмотрена математическая модель межзеренного скольжения по границе с уступами. На основе решения диффузионной задачи для вакансий при зернограничном проскальзывании в зависимости от соотношения граничной и объемной диффузии рассматривается роль влияния различной геометрии протяженных ступенек на величину скорости проскальзывания.

Таким образом, для учета влияния реальной геометрии границы на величину фона внутреннего трения необходимо разработать модель образования микронесплошности на границе кристалла общего типа.

В предлагаемой автором модели рассматриваются границы, содержащие периодически расположенные ступеньки противоположных знаков. В этом

случае граничные условия на соседних ступеньках различаются знаком, так что средняя концентрация на границе в силу симметрии всегда равна нулю. Это приводит к отсутствию объемных потоков вакансий из границы в целом.

Рассмотрим процесс проскальзывания вдоль несоразмерной границы, содержащей периодически расположенные ступеньки чередующихся знаков под действием внешнего сдвигового напряжения, приложенного к границе (рис.1).

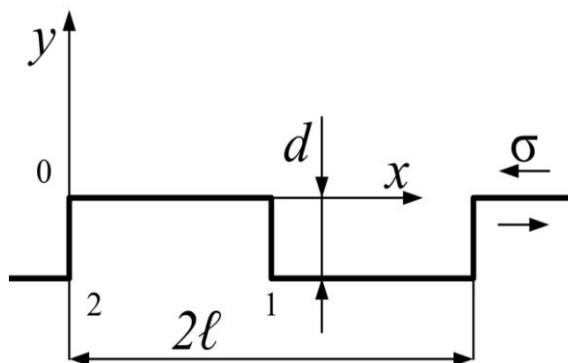


Рис. 1. Модель границы, содержащей периодически расположенные ступеньки чередующихся знаков.

Такое строение границы приводит к появлению нормальных напряжений в области ступенек, что в свою очередь приводит к изменению химического потенциала вакансий вблизи них. Таким образом, ступеньки становятся источниками и стоками вакансий. Процесс является неконсервативным и в зависимости от геометрических параметров ступеньки контролируется объемным диффузионным потоком вакансий или суммой граничного и объемного потоков, структурных и электрофизических свойств [6 – 8].

Превышение уровня растягивающих напряжений вблизи ступеньки 2, приводит к релаксации системы путем образования микронесплошности, ограниченной свободной поверхностью.

Решение задачи имеет тот же вид, но теперь под l_1 следует понимать половину расстояния между соседними ступеньками. Найдем асимптотические выражения для величины внутреннего трения на границах,

не содержащих поры, в двух предельных случаях.

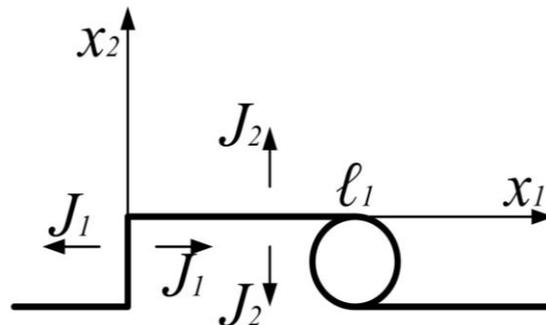


Рис. 2. Модель границы, содержащей периодически расположенные ступеньки чередующихся знаков и цилиндрические поры.

На рисунке 2 рассмотрена межкристаллитная граница общего типа, состоящая из параллельных плоских сегментов ширины l_1 , разделенных чередующимися ступеньками одинаковой высоты и цилиндрическими порами. Под действием переменного внешнего сдвигового напряжения на границе ступеньки становятся периодически источниками и стоками вакансий.

Выражения для скоростей проскальзывания, обусловленных зернограницным J_1 и объемным потоками J_2 , вакансий принимают вид:

$$v_1 = - \frac{2D_1 \delta \Omega}{d} \frac{\partial C_1(x_1, t)}{\partial x_1} \Big|_{x_1=0},$$
$$v_2 = - \frac{4D_2 l_1 \Omega}{d} \frac{\partial C_2(x_2, t)}{\partial x_2} \Big|_{x_2=0} \quad (1)$$

В двух предельных случаях найдены асимптотические выражения для частотной зависимости внутреннего трения на ступенчатых границах, не

содержащих поры.

Баланс сил на периоде структуры границы приводит к уравнению:

$$2l_1\sigma_0 \exp(i(\omega t + \varphi_\sigma)) = 2l_1\eta(v_1(t) + v_2(t)) + \frac{C_1 dkT}{C_0 \Omega} \exp(i\omega t). \quad (2)$$

Здесь σ_0 – амплитуда приложенного к границе сдвигового напряжения, φ_σ – фаза напряжений, η – эффективная сдвиговая вязкость границы.

Внутреннее трение равно $Q_1^{-1} = \frac{\Delta W_1}{2\pi W}$, где

$$\Delta W_1 = R \int_0^{l_1} \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} \operatorname{Re}(\sigma(x, t)) \operatorname{Re}(v(t)) dx dt \text{ и } W = \frac{V_0 \sigma_0^2}{2G}, \text{ где } V_0 \text{ – объем зерна, } G \text{ –}$$

модуль сдвига. В приближении сферической формы зерен радиуса R с учетом выражений: $\sigma(t) = \sigma_0 \exp(i(\omega t + \varphi_\sigma))$, $v(t) = v_1(t) + v_2(t)$. получаем:

$$Q_1^{-1} = \frac{3\kappa G}{\pi \sigma_0^2 R} \int_0^{\frac{\pi}{\omega}} \operatorname{Re}(\sigma(t)) \operatorname{Re}(v_1(t) + v_2(t)) dt. \quad (3)$$

1. Область низких частот или высоких температур. В этом случае $\gamma_1 l_1 \ll 1$, что равносильно $\frac{\omega l_1^2}{D_1} \ll 1$. Выражение (3) принимает вид:

$$Q_1^{-1} = \frac{6\kappa G \delta \Omega^2 C_0 D_1}{d^2 kTR \omega}. \quad (4)$$

2. Область высоких частот или низких температур $\gamma_1 l_1 \gg 1$. Выражение для скорости принимает вид $v_1 = \frac{2\sqrt{2} D_1 C_1 \delta \Omega \gamma_1}{d} \exp\left(i\left(\omega t - \frac{\pi}{4}\right)\right)$.

Выражение для внутреннего трения принимает вид:

$$Q_1^{-1} = \frac{3\sqrt{2}\kappa G \delta \Omega^2 C_0 l_1}{d^2 kTR} \sqrt{\frac{D_1}{\omega}}. \quad (5)$$

В случае границ, содержащих протяженные поры, внутреннее трение

несколько возрастает благодаря появлению объемных вакансионных потоков, приводящих к увеличению скорости взаимного движения зерен. Соответствующее возрастание величины внутреннего трения в рассмотренных выше асимптотических случаях описывается выражениями:

$$Q^{-1}_2 = \frac{6\kappa G D_2 l_1^2 C_0 \Omega^2}{d^2 k T R l_2 \omega}, \quad \gamma_2 l_2 \ll 1, \quad (6)$$

$$Q^{-1}_2 = \frac{6\sqrt{2}\kappa G l_1 C_0 \Omega^2 \sqrt{D_1 D_2}}{d^2 k T R \omega}, \quad \gamma_2 l_2 \gg 1. \quad (7)$$

Из выражений (4) и (6) видно, что внутреннее трение для $\gamma_1 l_1 \ll 1$ в обоих случаях обратно пропорционально частоте. При значениях $\gamma_1 l_1 \gg 1$ отношение объемного вклада во внутреннее трение к граничному согласно

(5) и (7) имеет вид: $\frac{Q^{-1}_2}{Q^{-1}_1} = \frac{1}{\delta} \sqrt{\frac{D_2}{\omega}}$, что в рассматриваемом случае высоких

частот и низких температур составляет весьма малую величину. Поэтому вкладом объемных потоков во внутреннее трение можно пренебречь, при этом роль примесей в металлах оказывает важное значение [9 – 11].

Таким образом, на основе разработанной модели границы зерен, содержащей периодически расположенные ступеньки чередующихся знаков и межкристаллитной границы общего типа, состоящей из параллельных плоских сегментов заданной ширины, разделенных чередующимися ступеньками одинаковой высоты и цилиндрическими порами, получены асимптотические выражения для расчетного определения фона внутреннего трения на границах общего типа для предельных случаев частотной зависимости.

Литература

1. Ларииков Л.Н., Исаичев В.И. Диффузия в металлах и сплавах. - Киев: Наукова думка, 1987.- 510 с.

2. Ежов А.А., Герасимова Л.П. Разрушение металлов. – М.: Наука. 2004. – 400 с.
 3. Чувильдеев В.Н. Неравновесные границы зерен в металлах. Теория и приложения. – М.: Физматлит, 2004. – 304 с.
 4. Кульков В.Г. Межзеренное проскальзывание по границе, сопрягающей плотноупакованную и некристаллографическую плоскости // Вестник МЭИ. – 2005. – № 5. – С. 96-100.
 5. Кульков В.Г. Межзеренное скольжение по границе с уступами // Поверхность. – 2005. – № 8. – С. 84-87.
 6. Кульков В.Г., Васильева Ю.В. Образование микронесплошностей в процессе проскальзывания по ступенчатой межкристаллитной границе // XI Международная конференция "Взаимодействие дефектов и неупругие явления в твердых телах" (IAPS XI). Сборник трудов. – Тула, изд. ТулГУ, 2008 г. – С. 71-76.
 7. Pankov S.Yu., Kalinin Yu.E., Makagonov V.A., Zhilova O.V., Chetverikova A.P., Kashirin M.A., Foshin V.A. The structure and electrical properties of $(\text{In}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2)_{25}$ thin films // Advanced Materials and Technologies. – 2020. – № 1 (17). – С. 43-48.
 8. Zhilova O.V., Pankov S.Yu., Sitnikov A.V., Kalinin Yu.E., Volochaev M.N., Makagonov V.A. Structure and electrophysical properties of thin-film $\text{SnO}_2\text{-In}_2\text{O}_3$ heterostructures // Journal of Materials Science: Materials in Electronics. – 2019. – Т. 30. – № 13. – С. 11859-11867.
 9. Золотухин И.В., Калинин Ю.Е. О высокотемпературном фоне внутреннего трения в кристаллических и аморфных твёрдых телах // ФТТ. 1995. Т. 37. № 2. С. 536-545.
 10. Батырев А. С., Бисенгалиев Р. А., Лиджиев Б.С., Сумьянова Е. В. Влияние ионно-аргонной бомбардировки на спектральные и вольт-амперные характеристики кристаллов CdS вблизи края фундаментального поглощения
-



// Инженерный вестник Дона, 2019, №4 URL:
ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2019/5860.

11. Карежев Х.М., Сохроков А.М. Влияние имплантации ионов кремния на анодное поведение пленок алюминия // Инженерный вестник Дона, 2020, №10 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2020/6823.

References

1. Larikov L.N., Isaichev V.I. Diffuziya v metallah i splavah [Diffusion in metals and alloys]. Kiev: Naukova dumka, 1987. 510 p.
2. Ezhov A.A., Gerasimova L.P. Razrushenie metallov [Destruction of metals]. M.: Nauka.2004. 400 p.
3. Chuvil'deev V.N. Neravnovesnye granicy zeren v metallah. Teoriya i prilozheniya [Nonequilibrium grain boundaries in metals. Theory and applications]. M.: Fizmatlit, 2004. 304 p.
4. Kul'kov V.G. Vestnik MEI. 2005. № 5. pp. 96-100.
5. Kul'kov V.G. Poverhnost'. 2005. № 8. pp. 84-87.
6. Kul'kov V.G., Vasil'eva Yu.V. XI Mezhdunarodnaya konferenciya "Vzaimodejstvie defektov i neuprugie yavleniya v tverdyh telah" (IIAPS XI). Sbornik trudov. Tula, izd. TulGU, 2008 g. pp. 71- 76.
7. Pankov S.Yu., Kalinin Yu.E., Makagonov V.A., Zhilova O.V., Chetverikova A.P., Kashirin M.A., Foshin V.A. Advanced Materials and Technologies. 2020. № 1 (17). pp. 43-48.
8. Zhilova O.V., Pankov S.Yu., Sitnikov A.V., Kalinin Yu.E., Volochaev M.N., Makagonov V.A. Journal of Materials Science: Materials in Electronics. 2019. T. 30. № 13. pp. 11859-11867.
9. Zolotuhin I.V., Kalinin Yu.E. FTT. 1995. T. 37. № 2. pp. 536-545.



10. Batyrev A. S., R. A. Bisengaliev, Lidzhiev B. S., Sumanova E. V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2019, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2019/5860.

11. Karezhev H.M., Sokhrokov A.M. Inzhenernyj vestnik Dona, 2020, №10 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2020/6823.