

05

Зернограничное внутреннее трение в сплавах с дисперсными включениями

© В.Г. Кульков

Филиал Московского энергетического института (ТУ), Волжский
E-mail: kulkov@vlz.ru

Поступило в Редакцию 20 апреля 2005 г.

Рассматривается роль частиц второй фазы в процессе зернограничного проскальзывания. Из решения уравнения для скорости скольжения с учетом внешней переменной нагрузки и внутреннего обратного напряжения частиц находится его вклад во внутреннее трение материала. Частотная зависимость внутреннего трения имеет характер широкого пика.

Твердые дисперсные частицы второй фазы, расположенные на межзеренной границе, являются эффективными стопорами для межзеренного проскальзывания. Локальный относительный сдвиг зерен имеет неоднородный характер и достигает наибольшей величины на участках границы, максимально удаленных от включений. Рассмотрим процесс диссипации энергии при проскальзывании по несоразмерным границам, содержащим жесткие включения. В отличие от специальных границ, где основным механизмом такой деформации является движение зернограничных дислокаций, скорость скольжения в границах такого типа контролируется процессами перестройки локальных атомных конфигураций [1].

Будем считать, что шаровидные частицы радиуса R_0 равномерно расположены в границе и пересекаются ею вдоль экваториальных кругов. Внутри них взаимного смещения зерен нет. Пусть к границе приложено постоянное сдвиговое напряжение σ , под действием которого взаимное макроскопическое смещение зерен вдоль границы равно u . Из баланса сил находим эффективное напряжение на стопорах, которыми являются круги, $\sigma_c = \sigma(\pi NR_0^2)^{-1}$, где N — количество включений на единице площади границы. В рассматриваемом случае нагружения системы включения, симметрично расположенные относительно зерен и напряжений, в лабораторной системе остаются в покое, а зерна смещаются в противоположных направлениях на $u/2$. С целью нахождения

взаимного смещения зерен решим вспомогательную задачу. Для этого будем представлять одно зерно как полупространство, ограниченное плоскостью границы. Перейдя к системе координат, жестко связанной с таким зерном, будем рассматривать смещения точек круга сечения под действием силы $\pi R_0^2 \sigma_c$, равномерно распределенной по его площади. Выбираем начало координат в центре несмещенного круга. Располагаем плоскость xu в границе так, чтобы сила была направлена вдоль оси x . В такой постановке приходим к задаче о равновесии упругой среды, ограниченной плоскостью [2] под действием поверхностной силы.

Если радиус включений мал по сравнению с расстоянием между ними $R_0^2 \ll N^{-1}$, смещения различных точек кругов можно считать одинаковыми и равными смещению центра. Используя выражение для компоненты G_{11} тензора Грина [2], найдем это смещение:

$$\frac{u}{2} = \int_{S_0} G_{11}(x, y) \sigma_c dS. \quad (1)$$

Здесь $G_{11}(x, y) = \frac{1+\nu}{\pi E} \left(\frac{1-\nu}{r} + \frac{\nu x^2}{r^3} \right)$, E — модуль Юнга, ν — коэффициент Пуассона, $r^2 = x^2 + y^2$. Интегрирование в (1) осуществляется по площади круга. Взяв интеграл в (1) и выразив σ , получим:

$$\sigma = \frac{\pi N E R_0}{2(1+\nu)(2-\nu)} u. \quad (2)$$

Это выражение дает связь сдвигового напряжения с взаимным смещением зерен в исходной (лабораторной) системе координат.

Скорость межзеренного проскальзывания существенно зависит от структуры границы и определяется диффузионной подвижностью вакансий в границе [3] либо подвижностью атомов растворенного компонента. В последнем случае примесные атомы, расположенные на границе, по мере развития проскальзывания поочередно становятся своеобразными стопорами. Их энергия повышается, и дальнейший локальный сдвиг возможен только после ликвидации стопоров путем их диффузионных перемещений вдоль границ в новые энергетически выгодные положения. Процесс проскальзывания контролируется скоростью возникновения и удаления стопоров. В этих условиях для скорости проскальзывания v по несовершенной границе под действием сдвигового напряжения σ , было

получено выражение [4]:

$$\nu = \frac{2\pi DkT}{\lambda^2 S_1^2 n} \sigma_t, \quad (3)$$

где D — зернограничный коэффициент диффузии примеси, S_1 — средний размер площади ячейки потенциального рельефа граничной плоскости зерна, λ — силовая константа взаимодействия атомов по обе стороны от границы, n — концентрация примесных атомов на границе. Множитель перед σ_t имеет смысл подвижности системы при зернограничном скольжении. Такое же выражение имеет место и для усредненных по площади границы с включениями величин скорости и напряжения. Записывая ν как du/dt и рассматривая σ_t как суперпозицию внешнего переменного напряжения $\sigma(t) = \sigma_0 \exp(i\omega t)$ и обратного напряжения от включения, имеющего вид (2), приведем (3) к виду

$$\frac{du}{dt} = \frac{2\pi DkT}{\lambda^2 S_1^2 n} \left(\sigma_0 \exp(i\omega t) - \frac{\pi NER_0}{2(1+\nu)(2-\nu)} u \right). \quad (4)$$

Решение уравнения (4) для установившегося режима колебаний имеет вид

$$u = \frac{2(1+\nu)(3-2\nu)\sigma_0}{\pi NER_0(1+\omega^2\tau^2)^{1/2}} \exp(i(\omega t - \varphi)), \quad (5)$$

$$\tau = \frac{\lambda^2 S_1^2 n(1+\nu)(2-\nu)}{\pi^2 DkTER_0 N}, \quad \text{tg } \varphi = \omega\tau.$$

Внутреннее трение, связанное с неоднородным проскальзыванием, определяется выражением [5]

$$Q^{-1} = \frac{\Delta W}{2\pi W}, \quad (6)$$

где $\Delta W = S \int_0^{2\pi/\omega} \text{Re}(\sigma(t)) \text{Re}(du/dt) dt$ — потери энергии за цикл на площади границы S , $W = \sigma_0^2 V/2E$ — максимальная упругая энергия колебания в объеме зерна V . Подставив эти выражения в (6) с учетом (5) и записав отношение $S/V = \gamma/d$, где d — размер зерна, а γ — геометрический коэффициент, учитывающий форму зерен, степень

принадлежности участков границы одному зерну и их ориентацию по отношению к внешнему напряжению, получим:

$$Q^{-1} = \frac{2(1+\nu)(2-\nu)\gamma}{\pi NR_0 d} \frac{\omega\tau}{1+\omega^2\tau^2}. \quad (7)$$

Частотная зависимость внутреннего трения, согласно (7), имеет вид дебаевского пика со временем релаксации $\tau = \tau_0 \exp(-Q/kT)$ и энергией активации граничной диффузии Q . Оценку предэкспоненциального множителя можно провести с учетом соотношений: $\lambda \sim Ea$, $Ea^3/kT_m \sim 50$ [6], $n/N \sim 10^2$, $a/R_0 \sim 10^3$, $S_1 \sim a^2$, где a — параметр решетки. Характерная температура в экспериментах по зернограничному внутреннему трению составляет примерно половину температуры плавления T_m . Это дает оценку $\tau_0 \sim 10^{-12}$ с. Такая величина характерна для процессов межкристаллитного проскальзывания на несоизмерных границах, где элементарными актами скольжения являются локальные перестройки двухъямных энергетических конфигураций атомов в границе [1,7]. Реально существующий пик имеет ширину больше дебаевской вследствие разброса размеров включений и неоднородности их расположения в границе. Выражения (7) и (5) показывают, что увеличение концентрации N включений на границе уменьшает высоту пика, что подтверждает их сдерживающее влияние на развитие процессов зернограничного проскальзывания [8,9]. Кроме того, возрастание N приводит к уменьшению времени релаксации τ , что также наблюдается в эксперименте [10].

Список литературы

- [1] Даринский Б.М., Кульков В.Г. // Поверхность. Физика, химия, механика. 1993. № 5. С. 153–156.
- [2] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. М.: Наука, 1987. 248 с.
- [3] Кульков В.Г. // Конденсированные среды и межфазные границы. 2001. Т. 3. № 4. С. 373–374.
- [4] Даринский Б.М., Кульков В.Г. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. В. 2. С. 65–68.
- [5] Новик А., Берри Б. Релаксационные явления в кристаллах. М.: Атомиздат, 1975. 472 с.
- [6] Чувильдеев В.Н. Неравновесные границы зерен в металлах. Теория и приложение. М.: Физматлит, 2004. 304 с.

- [7] Горбунов В.В., Даринский Б.М., Муштенко С.В. и др. // Изв. РАН. Сер. Физ. 1996. Т. 60. № 9. С. 137–143.
- [8] Блантер М.С., Головин И.С., Головин С.А., Ильин А.А., Саррак В.И. Механическая спектроскопия металлических материалов. М.: МИА, 1994. 256 с.
- [9] Luo B.H., Bai Z.H., Xie Y.Q. // Mater. Science and Eng. A. 2004. V. 370. N 1–2. P. 172–176.
- [10] Shigenaka N., Monzen R., Mori T. // Acta Metal. 1983. V. 31. N 12. P. 2087–2093.