

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

В. С. ПОСТНИКОВ

**ВНУТРЕННЕЕ ТРЕНИЕ И МОДУЛЬ СДВИГА ЧИСТОЙ МЕДИ  
И БЕРИЛЛИЕВОЙ БРОНЗЫ**

(Представлено академиком И. П. Бардиным 5 V 1953)

Нами исследовано изменение внутреннего трения и модуля сдвига чистой меди и бериллиевой бронзы в зависимости от температуры измерения и времени выдержки.

В качестве меры внутреннего трения  $Q$  был принят логарифмический декремент затухания свободных крутильных колебаний проволочных образцов длиной в 300 мм и толщиной в 0,7 мм. Наибольшая деформация кручения не превышала  $10^{-5}$ , а деформация растяжения, обусловленная продольной нагрузкой, не превосходила  $10^{-6}$ . Измерения производились в вакууме порядка  $10^{-5}$  мм рт. ст. Точность измерения внутреннего трения составляла 1—2%. Для стабилизации температуры служил терморегулятор с фотоэлементом, обеспечивавший постоянство температуры в каждой точке всего температурного интервала ( $20 - 700^\circ$ ) с точностью до  $\pm 0,5^\circ$ . Температура измерялась хромель-алюмелевой термопарой потенциометрическим методом с точностью до  $\pm 0,5^\circ$ .

Образцы изготовлялись из чистой меди (99,992% Cu) из сплава этой меди с бериллием (1,9% Be)\*. Обжатие достигало 27%.

Результаты исследования представлены на рис. 1, 2, 3 и 4.

Из рис. 1 видно, что характер зависимости внутреннего трения для чистой меди (кривая III) и бериллиевой бронзы, полученной на основе этой меди, резко различны. Обращает на себя внимание максимум внутреннего трения в области  $224^\circ$  для чистой меди. Появление этого максимума можно объяснить на основе теории релаксационных явлений в твердых телах (1-3).

По этой теории внутреннее трение твердого тела, обусловленное явлением с одним временем релаксации, можно представить формулой

$$Q = \frac{\Delta_0 \omega \tau}{1 + \frac{M_\infty}{M_0} (\omega \tau)^2}. \quad (1)$$

Здесь  $\omega$  — циклическая частота колебаний;  $\tau$  — период релаксации;  $M_0$  — значение модуля при  $\omega = 0$  (под  $M$  можно понимать модуль упругости  $E$ , модуль жесткости  $G$ , модуль всестороннего сжатия  $K$ );

$M_\infty$  — значение модуля при  $\omega = \infty$ ;  $\Delta_0 = \frac{M_\infty - M_0}{M_0}$  — так называемый «дефект модуля» или степень релаксации.

\* Образцы любезно предоставлены Научно-исследовательским институтом Гипроцветметобработки.

Внутреннее трение, выраженное в функции параметра  $\omega\tau$ , имеет острый максимум при  $\omega\tau = 1$ . Таким образом, согласно теории, появление максимума объясняется тем, что частота колебаний  $\omega$  образца совпадает с обратной величиной времени релаксации рассматриваемого релаксационного явления. В случае поликристаллической меди таким явлением может быть вязкое течение по границам зерен при повышенных температурах. Действительно, для объяснения так называемых „упругих несовершенств“ материала была введена идея „двухкомпонентной системы“ (3, 4). Эта идея заключается в том, что твердое тело представляется состоящим из двух фаз, одна из которых аморфна, другая совершенно упруга. Упругая фаза подчиняется закону Гука, а аморфная — релаксационному уравнению Максвелла (4).

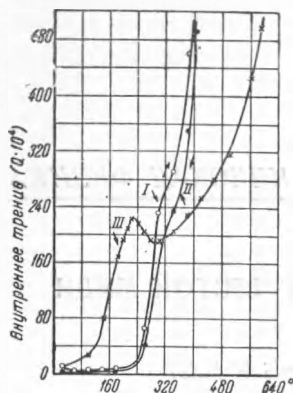


Рис. 1. Изменение внутреннего трения твердого раствора Be в Si в зависимости от температуры измерения. I — нагрев, II — охлаждение, III — чистая медь

В случае внезапной остановки деформации на значении  $\varphi_0$  напряжение исчезает не сразу, а будет постепенно ослабевать (релаксировать) со временем релаксации  $\tau$ , зависящим от температуры по закону

$$\tau = \tau_0 e^{H/RT} \quad (2)$$

Оно будет также зависеть от физической природы аморфных областей, от их размеров и формы. Роль аморфных областей могут выполнять границы зерен.

При периодическом деформировании поликристаллического тела в нем возникают, следовательно, перемещения по границам зерен, приводящие к рассеянию энергии. Рассеяние энергии (внутреннее трение) будет наибольшим тогда, когда время релаксации, связанное с движением по границам зерен, будет сравнимо с частотой деформации, т. е.  $\omega\tau = 1$ .

В нашем опыте частота колебаний оставалась неизменной, но изменялась температура, а значит, и время релаксации  $\tau$ , определяемое уравнением (2). Изменение температуры, а вместе с ней и времени релаксации  $\tau$  может привести к совпадению частоты деформации с обратной величиной времени релаксации и, значит, к появлению максимума внутреннего трения при некоторой температуре.

Теплоту активации  $H$ , входящую в формулу (2) и связанную с перемещением атомов по границам зерен, можно определить следующим образом. Пусть имеются две кривые внутреннего трения в зависимости от температуры измерения, одна из которых получена при постоянной частоте  $\omega_1 = 2\pi f_1$ , а вторая при  $\omega_2 = 2\pi f_2$  (рис. 3). Взяв на этих двух кривых две точки, соответствующие максимумам внутреннего трения получим

$$f_1 \tau_1 = f_2 \tau_2,$$

или, согласно выражению (2),

$$f_1 e^{H/RT_1} = f_2 e^{H/RT_2}.$$

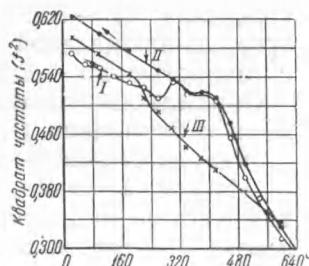


Рис. 2. Изменение модуля сдвига твердого раствора Be в Si в зависимости от температуры измерения. I — нагрев, II — охлаждение, III — чистая медь

Логарифмируя обе части полученного уравнения, получим после простого преобразования

$$H = \frac{RT_1 T_2}{T_2 - T_1} \ln \frac{f_2}{f_1}. \quad (3)$$

По известным  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $\Delta T$ ,  $f_2$  и  $f_1$  (рис. 3) нами получено

$$H = 52\,400 \pm 4600 \text{ кал/моль.}$$

Известно <sup>(5)</sup>, что в температурном интервале 260—310° происходит распад пересыщенного твердого раствора Ве в Си с выделением  $\gamma$ -фазы.

Сопоставление исследованного нами температурного хода внутреннего трения и модуля сдвига чистой меди и бериллиевой бронзы (рис. 1 и 2) показывает, что указанный процесс проявляется и в поведении этих характеристик в том же температурном интервале.

Нами был измерен ход внутреннего трения и модуля сдвига со временем при различных температурах старения (от 200 до 300° через каждые 20°). Опыт показывает, что внутреннее трение уменьшается при изотермической выдержке сплава, сопровождающейся выделением новой фазы.

Кривые изменения внутреннего трения со временем при изотермических выдержках будут отражать кинетику распада пересыщенного твердого раствора.

Изменение внутреннего трения со временем при постоянной температуре можно представить уравнением

$$Q(t, T) = Q_\infty(T) + [Q_0(T) - Q_\infty(T)] e^{-t/\tau}, \quad (4)$$

где  $Q_0(T) = Q(0, T)$ ;  $Q_\infty(T) = Q(\infty, T)$ ;  $\tau$  — время релаксации рассматриваемого процесса, очевидно, зависящее от температуры по закону, аналогичному (2). Для определения  $\tau$  обратимся к кривой внутреннего трения, отвечающей  $T = 300^\circ$ .

Предполагая, что теоретическая кривая внутреннего трения (4) совпадает с экспериментальной кривой для  $t = 30$  мин., получаем  $\tau = 616$ , и, следовательно, для этой температуры

$$Q(t) = 0,0126 + 0,0254 e^{-t/616}. \quad (5)$$

Теоретическая кривая, построенная по формуле (5), совпадает с экспериментальной кривой I (рис. 4) вплоть до точки  $t = 3$  часа. Расхождение кривых при  $t > 3$  обусловлено процессами, сопровождающими распад (коагуляция и др.), не учитываемыми уравнением (4).

6 ДАН, т. 91, № 1

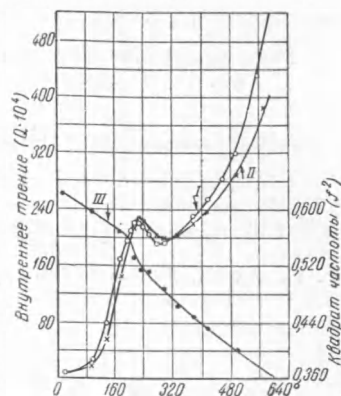


Рис. 3. Изменение внутреннего трения (I и II) и модуля сдвига (III) поликристаллической меди в зависимости от температуры измерения. I и III — частота  $f = 0,787$  пер/сек,  $t = 20^\circ$ ; II — частота  $f = 2,137$  пер/сек,  $t = 20^\circ$

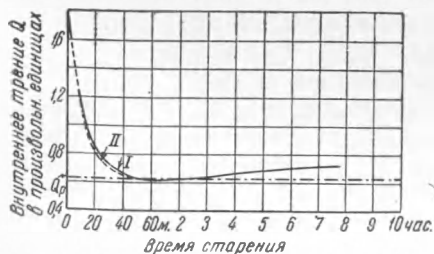


Рис. 4. Кинетика распада перемещенного раствора Ве в Си при отпуске на 300°. I — экспериментальная кривая, II — теоретическая кривая

Принимая для зависимости времени релаксации от температуры выражение (2), где  $H$  — теплота активации процесса выделения атомов  $Be$  из твердого раствора, и определив  $\tau$  для различных температур старения, получаем из температурной зависимости  $\tau$  в координатах  $\ln \tau, 1/T$

$$H = 16\,000 \pm 300 \text{ кал/моль.}$$

Определение  $H$  по измерениям электрического сопротивления и твердости в работе (6) дало преувеличенные значения, равные, соответственно, 23 000 и 29 000 кал/моль.

Московский институт стали  
им. И. В. Сталина

Поступило  
8 IV 1953,

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> Б. Н. Финкельштейн, Н. С. Фастов, ДАН, 71, № 5, 875 (1950).  
<sup>2</sup> Проблемы металловедения и физики металлов, 1951, стр. 245. <sup>3</sup> С. Zener, Elasticity and Anelasticity of Metals, 1948. <sup>4</sup> Я. И. Френкель, Введение в теорию металлов, 1950. <sup>5</sup> Бериллий и его сплавы, 1931. <sup>6</sup> A. G. Guy, C. S. Barrett, P. F. Mehl, Metals Technology, 15, T. P. 2341 (1948).