

Академик Вьет. И. СПИЦЫН, О. А. ТРОИЦКИЙ, П. Я. ГЛАЗУНОВ

ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГИИ БОМБАРДИРУЮЩИХ ЭЛЕКТРОНОВ НА РАДИАЦИОННО-МЕХАНИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

Целью настоящей работы является изучение влияния энергии ускоренных электронов на величину радиационно-механического эффекта⁽¹⁻³⁾. Знание характера этой зависимости в широком интервале энергий бомбардирующих частиц, включая энергии меньше порогового значения выбивания атомов, позволит оценить роль фононных и электронных механизмов в радиационном изменении прочности и пластичности материалов.

Для проведения экспериментов использовались шесть длинных монокристаллов цинка (99,998% Zn) диаметром ~ 1 мм и протяженностью 280—300 мм, полученные методом зонного расплавления из поликристаллической проволоки. Ориентация кристаллов, выращенных по затравкам, характеризовалась значением $\chi_0 = 45^\circ - 47^\circ$ (χ_0 — угол между плоскостью базиса и осью образца). Каждый длинный кристалл разрезался на 15—16 частей, из которых были подготовлены рабочие образцы длиной 18 мм. В каждой партии 12—14 образцов использовались для испытания под облучением по тому или иному режиму и остальные — для контроля без облучения.

Плотность потока электронов во всех опытах сохранялась постоянной и равной $\sim 3,6 \cdot 10^{11}$ эл/см²·сек. Энергия бомбардирующих электронов изменялась следующим образом: I режим 3,50 Мэв; (II) 2,81 Мэв; (III) 2,30 Мэв; (IV) 1,83 Мэв; (V) 1,32 Мэв; (VI) 0,82 Мэв; (VII) 0,40 Мэв. При уменьшении энергии электронов с сохранением постоянства интенсивности потока температура образцов несколько уменьшается. Поэтому половина контрольных образцов испытывалась при минимальной температуре облучения, другая половина — при максимальной.

Образцы растягивались на испытательной машине типа прибора Поляни, снабженной дистанционным силоизмерительным датчиком. Точность определения нагрузок составляла 1—2 г. Температура облучаемых образцов контролировалась хромель-копелевой термопарой и составляла 52°—58° С. Скорость деформации была равна 0,41 мм/мин. Использовался следующий режим растяжения под облучением: активная деформация в течение 30 сек, затем трехминутная пауза с остановкой растяжения без снятия нагрузки; снова 30 сек. растяжения, трехминутная пауза, и т. д. (рис. 1). Такая методика механического нагружения образцов применялась для того, чтобы вызвать в период активного растяжения свежие дислокации и их накопление для наблюдения в паузах влияния облучения на релаксацию приложенных механических напряжений.

В эксперименте фиксировались отдельно электронный ток, поглощаемый на образце, и ток с цилиндра Фарадея (монитор). Это позволяло, во-первых, сохранить постоянной плотность электронного тока и, во-вторых, оценить число поглощенных в образце электронов.

Монокристаллические образцы цинка ориентировались под облучением таким образом, что направление движения электронов примерно совпадало с элементами скольжения кристаллов (0001) $\langle 11\bar{2}0 \rangle$.

С увеличением энергии электронов от 0,40 Мэв до 3,50 Мэв происходит уменьшение предела текучести P_T облучаемых образцов на 20—25% и увеличение релаксированной части напряжений $\Delta\sigma$ в паузах при остановках растяжения на 160—180%. Эффект радиационной релаксации напряжений оказался максимальным в области предела текучести образцов. Поскольку предел текучести связан с началом массового движения дислокаций, обнаруженное явление объясняется, в основном, взаимодействием электронов с дислокациями. Контрольные образцы, испытанные при минимальной и максимальной температурах облучения (50° — 52° и 56° — 58°), показали в первых паузах более чем в два раза меньшую релаксацию. Предел текучести контрольных образцов по измерениям был выше предела текучести облучаемых образцов, находящихся при соответственно равных температурах. С ростом энергии бомбардирующих частиц

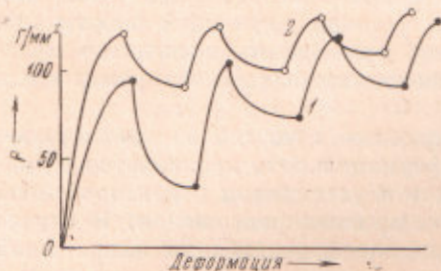


Рис. 1

Рис. 1. Характерные кривые деформации облучаемых (1) и необлучаемых (2) кристаллов

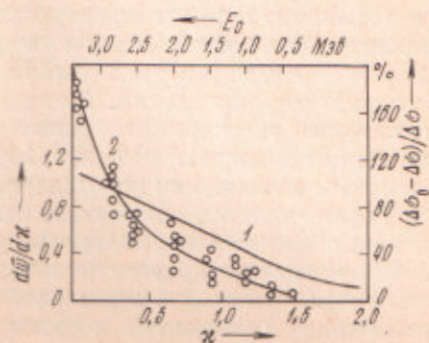


Рис. 2

Рис. 2. Приближенная зависимость распределения средней поглощенной энергии пучка электронов dW/dx (1) и величины радиационно-механического эффекта $(\Delta\sigma_0 - \Delta\sigma) / \Delta\sigma$ (2) от приведенного пробега x и энергии бомбардирующих частиц E_0

ток, снимаемый с образцов, уменьшался более чем на порядок величины (от 0,42 μ а до 0,01 μ а). Причиной этого является то, что с увеличением энергии электронов уменьшается их поглощение в материале. Согласно (*), отношение проходящего потока электронов к падающему определяется величиной $\exp[-(x/CE_0^p)^r]$, где b — толщина образца, равная в данном случае 714 мг/см^2 , E_0 — начальная энергия электронов в Кэв, C , n и p — константы. Учитывая, что ток i , снимаемый с образца в процессе облучения, характеризует разницу потоков падающих и проходящих электронов, а также вводя параметр $x = x/CE_0^p$, имеющий смысл приведенного пробега электронов, можно получить следующее выражение $i = 0,42 \cdot [1 - \exp(-x^p)]$. Значение p для цинка должно быть близко к значению p для меди $p = 1,7$ (*). Приняв это значение p для цинка, рассчитали величины x при различных i . В результате расчета было найдено, что параметры C и n имеют значения $7,4 \cdot 10^3$ и 1,6, что примерно совпадает с данными (*) для меди (соответственно $5,8 \cdot 10^3$ и 1,53).

На рис. 2 сопоставлены приближенная зависимость распределения средней поглощенной энергии пучка электронов dW/dx от приведенного пробега x , построенной на основании работ (*-6), с зависимостью величины радиационно-механического эффекта $(\Delta\sigma_0 - \Delta\sigma) / \Delta\sigma$ от x . Из графика следует, что с увеличением энергии бомбардирующих частиц, вызывающим уменьшение приведенного пробега x , плотность поглощенной энергии несколько увеличивается (этому отвечает повышение температуры кристаллов на 6—7°). Однако увеличение поглощенной энергии происходит медленнее, чем возрастает величина радиационно-механического

эффекта в области высоких энергий. Последнее может свидетельствовать о том, что часть энергии бомбардирующих электронов диссипирует на системе движущихся и взаимодействующих дислокаций.

Релаксация напряжений в металле может возникнуть в результате диффузии дефектов, бывших в металле и образовавшихся во время облучения и деформирования, к местам, где их присутствие приведет к понижению напряжений (⁷). Однако в описываемых экспериментах роль радиационных точечных дефектов была мала, так как их концентрация не превышала 10^{-12} — 10^{-14} ат. %.

Можно предположить, что отмеченная интенсификация пластической деформации металла происходит за счет облегчения дислокационных реакций и разблокировки дислокаций от препятствий на плоскости скольжения при прохождении квазитермических процессов во время облучения (в частности, пики температур вдоль трека частиц). Определенную роль может играть также ускорение движения и взаимодействия дислокаций по решетке при наличии дрейфа электронов в направлении движения большинства дислокаций. Методические условия настоящей работы при постановке эксперимента способствовали проявлению последнего механизма, поскольку поток бомбардирующих частиц был ориентирован вдоль элементов скольжения кристаллов.

Таким образом, электроны, инжектируемые в металл во время растяжения, облегчают его пластическую деформацию. Это проявляется в снижении предела текучести монокристаллов и увеличении релаксированной части приложенных напряжений при остановках растяжения. В случае небольших деформаций эффект радиационной релаксации напряжений максимален в области предела текучести образцов. С возрастанием энергии бомбардирующих электронов при одной и той же интенсивности потока частиц происходит уменьшение предела текучести облучаемых образцов и возрастает релаксированная часть напряжений, т. е. происходит увеличение радиационно-механического эффекта. Анализ полученных данных и сопоставление с результатами работ по поглощению электронов в веществе позволяет предположить, что часть энергии бомбардирующих частиц диссипирует на системе движущихся и взаимодействующих дислокаций.

Институт физической химии
Академии наук СССР

Поступило
12 VIII 1970

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ О. А. Троицкий, В. И. Лихтман, ДАН, 148, 332 (1963). ² О. А. Троицкий, И. Г. Березина, Физ. мет. и металловед., 18, 125 (1964). ³ О. А. Троицкий, И. М. Кулешов, В. И. Лихтман, Физ. мет. и металловед., 16, 44 (1963). ⁴ А. Ф. Махов, ФТТ, 11, № 9, 1261 (1960); 11, № 9, 2172 (1960); 11, № 9, 2176 (1960). ⁵ А. Я. Вятский, А. Н. Пилянкович, В. В. Трунов, ФТТ, 6, № 5, 1563 (1964). ⁶ В. С. Равин, ФТТ, 7, № 11, 3430 (1965). ⁷ П. А. Платонов, Сборн. Действие ядерных излучений на материалы, М., 1962.