

О. А. ТРОИЦКИЙ, академик В. И. СПИЦЫН

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛА МЕТОДОМ РЕЛАКСАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ И ПОЛЗУЧЕСТИ

Релаксация приложенных напряжений, по определению Фелтама (¹), объясняется перераспределением и уменьшением пиков внутреннего напряжения в материале под влиянием остаточных деформаций и микроскопических локальных сдвигов в кристаллической решетке. Таким образом, с помощью метода релаксации напряжений можно изучать закономерности пластической деформации металла и, в частности, деформацию, стимулированную импульсами тока (²⁻⁴).

Для проведения экспериментов использовали двойные образцы по размерам и по форме такие же, как в опытах с активным растяжением образцов (⁴). Образцы имели рабочую деформируемую часть А и нерабочую часть Б, которая находилась под действием импульсов тока, чтобы вызывать периодические упругие колебания во всем образце. Если через $\Delta\sigma_A$ обозначить релаксацию напряжений в случае прохождения тока по части А образца, а через $\Delta\sigma_B$ — по части Б, то разность $\Delta\sigma_A - \Delta\sigma_B$ может характеризовать релаксацию напряжений в металле, связанную с истинной электропластической деформацией образцов, включая возможное тепловое действие тока.

Использовали кристаллы цинка ориентации $\chi_0 = 22-24^\circ$ (угол между плоскостью базиса и осью образца). Скорость растяжения образцов до включения пауз релаксации нагрузки составляла 0,04 см/мин. Точность определения релаксированных напряжений ± 3 г/мм². Образцы деформировали в жидком азоте; использовали четыре предела нагружения $P = 200; 300; 400$ и 500 г. После достижения первого предела нагружения привод испытательной машины останавливали и следовала пауза релаксации напряжений, в период которой фиксировали падения напряжений через 3; 10; 20 сек., 1; 3 и 6 мин. Затем вновь включался привод машины и нагрузка поднималась до следующего предела нагружения, где вновь включалась пауза релаксации напряжений и т. д.

Импульсный ток имел частоту $\nu = 400-2050$ гц, среднюю величину $I_{cp} = 1-6$ а/мм², амплитудные значения $I_a = 12-380$ а/мм² и длительности импульсов $\tau = (30-90) \cdot 10^{-6}$ сек. Проводили тщательные (с точностью $0,005^\circ$ С) измерения температуры образцов по отношению к окружающему жидкому азоту с помощью дифференциальных медь-константановых термопар на чувствительных пределах измерений прибора Ф 116/1. Тепловое действие тока моделировали при эквивалентном нагреве образцов переменным током.

Для кристаллов цинка при низких температурах как и для большинства материалов, релаксация напряжений описывается логарифмической зависимостью $\Delta\sigma = r \ln t$ ($r = (\sigma_0/Q_0)kT$, σ_0 — приложенное напряжение, Q_0 — эффективная энергия активации, t — время релаксации). Не менее важным параметром (помимо энергии активации), характеризующим пластическую деформацию металла, является активационный объем V . Если полагать, что атермическая компонента приложенных напряжений остается при электронном воздействии неизменной, то релаксация напряжений $\Delta\sigma$ будет происходить только за счет уменьшения эффективного напряжения,

а активационный объем запишется в виде

$$V = \frac{d \ln \dot{\gamma}}{d\tau} kT \simeq \frac{d \ln (\Delta \dot{\sigma})}{d\sigma} kT. \quad (1)$$

$\dot{\gamma}$ — скорость сдвиговой деформации, $\Delta \dot{\sigma}$ — скорость релаксации. Очевидно, величина V может быть определена из наклона графика зависимости $\sigma = f[\ln (\Delta \dot{\sigma})]$.

На рис. 1 приведена зависимость логарифма скорости релаксации напряжений $\ln (\Delta \dot{\sigma})$ от приложенных напряжений σ при прохождении тока по деформируемой А части двойных образцов и по недеформируемой В части

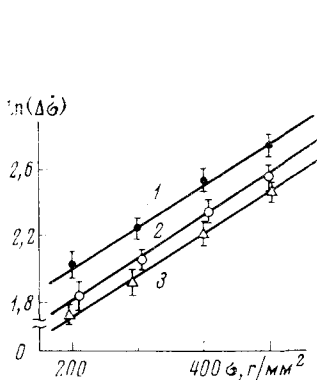


Рис. 1

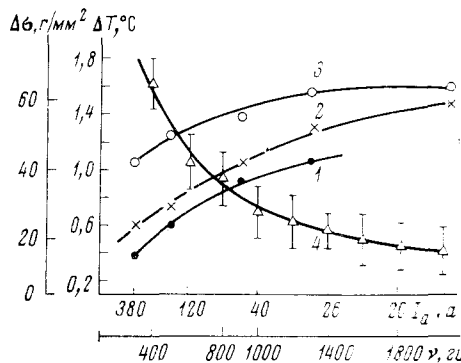


Рис. 2

Рис. 1. Зависимость логарифма скорости релаксации напряжений от приложенных напряжений при прохождении тока по деформируемой А (1) и по недеформируемой В части двойных образцов (2) и в случае действия на деформируемую часть переменного тока, создающего эквивалентный нагрев металла (3)

Рис. 2. Влияние частоты импульсного тока на релаксацию напряжений в кристаллах цинка (моно-Zn, $\chi_0 = 32^\circ$) при постоянном среднем значении тока $I_{cp} = 3$ а/мм² (1–3), а также на изменение температуры испытываемых образцов (4) по отношению к окружающему жидкому азоту. 1 — $P_2 = 200$ г, 2 — $P_3 = 300$ г, 3 — $P_4 = 400$ г

образцов, а также аналогичная зависимость для случая действия на деформируемую часть образцов переменного тока создающего эквивалентный нагрев образцов по отношению к окружающему жидкому азоту (на $0.6 \pm 0.2^\circ \text{C}$).

Из этих данных следует, во-первых, что пинч-эффект (упругое сжатие образцов собственным магнитным полем и связанное с этим генерирование упругих колебаний всего образца при прохождении в недеформируемой части В импульсов тока) не определяет всей величины релаксации напряжений под влиянием импульсов тока. Существенная часть релаксации напряжений (скорости релаксации) зависит от взаимодействия тока с актами пластической деформации металла, т. е. от истинного электропластического эффекта (э.п.э.), включая возможное тепловое действие тока. Во-вторых, эквивалентный тепловой нагрев образцов не дает той величины релаксации напряжений, которая возникает при действии на деформируемый металл импульсным током. Из двух обсуждаемых и исследуемых побочных факторов действия импульсного тока на пластическую деформацию металла (теплового и пинч-действия) основным является пинч-эффект.

Из приведенных на рис. 1 данных следует также, что угол наклона графиков зависимости $\ln (\Delta \dot{\sigma}) = f(\sigma)$ существенно не изменяется при использованных энергетических воздействиях на деформируемые кристаллы. Отсюда можно сделать вывод, имея в виду зависимость (1), что активационный объем в результате таких воздействий существенно не изменился.

По величине угла наклона указанных графиков была найдена величина активационного объема $V=6,9 \cdot 10^{-20}$ см³, что примерно соответствует величинам V для кристаллов цинка при температуре жидкого азота по данным других авторов⁽⁵⁾.

На рис. 2 приведена зависимость релаксированной части напряжений от частоты тока при постоянном среднем значении тока $I_{cp}=3$ а/мм² и изменяющемся в соответствии с зависимостью $I_{cp}=I_{ат} \tau K$ (τ — длительность, ν — частота импульсного тока и $K \leq 1$) амплитудном значении тока $I_a = 12-380$ а/мм². Как видно из рис. 2, с увеличением частоты тока величина эффекта парастает. На рис. 2 приведены также данные, касающиеся

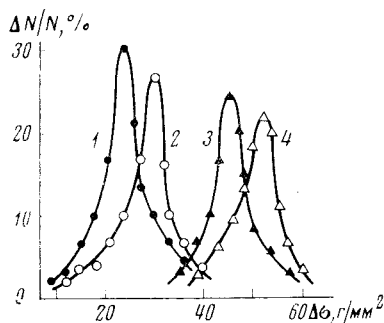


Рис. 3

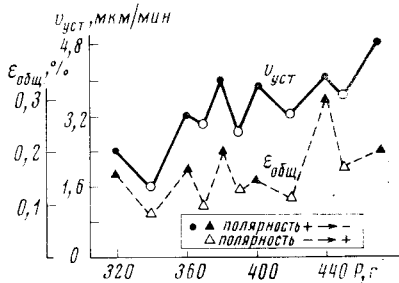


Рис. 4

Рис. 3. Распределение релаксированной части напряжений в период пауз релаксации по 3 мин. (1, 2) и по 6 мин. (3, 4) для кристаллов цинка, легированных кадмием ($2 \cdot 10^{-2} \% \text{ Cd}$). Кривые 1, 3 и 2, 4 характеризуются соответственно одинаковой полярностью тока

Рис. 4. Изменение скорости установившейся ползучести $v_{уст}$ и общей деформации ползучести $\epsilon_{общ}$ за 40 мин. нагружения в зависимости от уровня приложенной нагрузки и направления тока в кристалле цинка (моно-Zn, -196°)

теплового действия тока ΔT при его уменьшающихся амплитудных значениях. Ход зависимости ΔT с увеличением частоты тока ν является обратным тому, который имеет место для $\Delta \sigma$. Таким образом, тепловые эффекты не были определяющими в описанных опытах.

При изучении вопроса о влиянии длительности импульсов тока τ на величину эффекта релаксации напряжений в металле, стимулированной импульсным током, было найдено, что в интервале значений $\tau = (30-90) \cdot 10^{-6}$ сек. с ростом длительности импульсов происходит усиление эффекта. Это согласуется с теорией Фикса в отношении влияния электронного ветра на поведение дефектов в кристаллической решетке полупроводников и металлов⁽⁶⁾.

Во второй части работы была исследована зависимость величины э.п.э. от полярности импульсного тока. Использовали кристаллы цинка ориентации $\chi_0 = 15-18^\circ$, характеризующиеся базисным скольжением. В этом случае угол между плоскостью скольжения дислокаций и направлением тока в образцах был малым и при смене полярности тока направление электронного ветра с благоприятного для части движущихся дислокаций сменялось на неблагоприятное. Поскольку от образца к образцу число дислокаций первого и второго типов для одной и той же полярности тока на зажимах испытательной машины могло изменяться (в связи с неопределенностью установки образцов в зажимы испытательного устройства и неизвестными конкретными условиями зарождения и распространения сдвигов в кристаллической решетке с участием дислокаций разного знака), в этом опыте была разработана специальная методика циклического нагружения образцов с малой догрузкой их в каждом цикле по 20 г, дающей практически постоянное значение $\Delta \sigma$ без тока. Разброс величины $\Delta \sigma$ в этом случае при повтор-

ных нагружений не превышал ± 3 г/мм², что соответствовало погрешностям измерений $\Delta\sigma$ (аппаратурная погрешность). В случае же пропуска тока через образцы (в этом опыте использовали простые образцы) и смены полярности тока во время опыта в каждом цикле, например сверху вниз, появилась возможность по абсолютной величине разницы $|\Delta\sigma_v - \Delta\sigma_n|$ судить о наличии и величине полярности э.п.э.

На рис. 3 приведены кривые распределения релаксированной части напряжений в период пауз 3 и 6 мин. при различной полярности тока (одинаковую полярность характеризуют соответственно четные и нечетные кривые). Как видно из этих данных, действие импульсного тока на релаксацию напряжений характеризуется наличием эффекта полярности. Поскольку средняя величина $\Delta\sigma$ для пауз релаксации по 6 мин. составляла 45–48 г/мм², а разброс величины $\Delta\sigma$ при повторных циклах нагружения не превышал 3 г/мм², точность проведенных измерений полярности действия тока составляла 6–7%, а величина эффекта составляла 14–15%.

Было исследовано также влияние смены полярности тока на скорость ползучести кристаллов цинка при небольших их догрузках за пределом текучести. Для повышения чувствительности метода использовали длинные кристаллы (длина 300 мм, диаметр 1 мм). Деформацию ползучести измеряли при помощи механо-электрического преобразователя Э-2Д1 с точностью $3 \cdot 10^{-6}$. Использовали две методики измерений: 1) измерение деформации ползучести за 40 мин. после каждой догрузки кристалла по 5–10 г со сменой направления тока в кристалле в каждом новом цикле нагружения, 2) с изменением направления тока на участках с установившейся ползучестью продолжительностью по 20 мин. Импульсный ток имел амплитудные значения 450–500 а/мм², средние значения плотности тока 0,5–1,0 а/мм², частота 14 гц, длительность импульсов 150 мксек.

На рис. 4 представлено изменение скорости установившейся ползучести $v_{уст}$ кристалла цинка, а также общей деформации указанных образцов $\epsilon_{общ}$ за 40 мин. нагружения в зависимости от направления тока в кристаллах и уровня приложенной нагрузки. Как видно из представленных данных, смена направления тока в образцах вызывает изменение как скорости установившейся ползучести, так и суммарной деформации ползучести кристаллов. Таким образом, в опытах с ползучестью подтверждено наличие полярности действия тока на пластическую деформацию кристаллов цинка.

Полученный результат объясняется тем, что некоторая часть дислокаций в кристалле двигалась в одном направлении, а направление электронного ветра изменялось. При этом возникало изменение в электрон-дислокационном взаимодействии, а также, возможно, в связанном с ним взаимодействии дислокаций со стопорами.

Институт физической химии
Академии наук СССР
Москва

Поступило
20 II 1975

ЛИТЕРАТУРА

- ¹ П. Фелгам, Деформация и прочность материалов, М., «Металлургия», 1968.
² О. А. Троицкий, Письма ЖЭТФ, т. 10, 18 (1969). ³ О. А. Троицкий, А. Г. Розно, ФТТ, т. 12, 203 (1970). ⁴ В. И. Спицын, О. А. Троицкий, ДАН, т. 220, 1070 (1974).
⁵ И. А. Гиндин и др., Изв. высш. учебн. завед., Физика, № 6 (109), 110 (1971).
⁶ Б. Д. Фикс, Ионная проводимость в металлах и полупроводниках (электроперенос), М., «Наука», 1969.