

Академик В. И. СПИЦЫН, О. А. ТРОИЦКИЙ

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО И ПИНЧ-ДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНОГО ТОКА НА ПЛАСТИЧЕСКУЮ ДЕФОРМАЦИЮ МЕТАЛЛА

В работах (<sup>1-10</sup>) экспериментальным путем показано, что изменение состояния энергетического спектра электронов в металлах влияет на формирование таких их свойств, как прочность и пластичность. Главная экспериментальная трудность подобного рода исследований заключается в том, что у металлов практически невозможно оказывать влияние на электронную подсистему, не вызывая тепловых изменений в решеточной подсистеме. Дополнительные трудности возникают при использовании импульсного тока, хотя этот вид электронного воздействия на деформируемый металл имеет очевидное преимущество по сравнению со стационарным пропусканием тока (в том числе и переменного): повышение допустимой по соотношению нагрева образцов плотности тока на два—три порядка величины. Импульсный ток плотностью  $\sim 10^3$  а/мм<sup>2</sup> в короткие промежутки времени (порядка  $\sim 10^{-4}$  сек.) оказывает заметное пинч-действие на деформируемые образцы — давление собственным магнитным полем, в результате чего появляются упругие колебания металла, а это, подобно действию ультразвука (<sup>11</sup>), может отразиться на величине сопротивления металла пластическому деформированию. Во время действия импульсного тока указанной величины может также возникнуть незначительный нагрев образцов (на десятки доли градуса при температуре жидкого азота).

Целью настоящей работы было выделение указанных побочных действий импульсного тока в общем снижении сопротивления металла пластическому деформированию. Для этого использовали двойные образцы (рис. 1а), имеющие рабочую деформируемую часть *A* и нерабочую часть *B*, которая не деформировалась, но находилась под током, чтобы вызывать периодические упругие колебания во всем образце. Если через  $\Delta P_A$  обозначить скачок деформирующего усилия в случае прохождения тока по части *A*, а через  $\Delta P_B$  — по части *B*, то разность ( $\Delta P_A - \Delta P_B$ ) может характеризовать сопротивление металла пластическому деформированию, обусловленное истинной электропластической деформацией образцов, включая возможное тепловое действие тока.

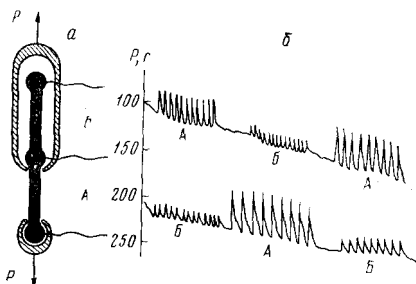
Проведены тщательные измерения температуры образцов, которые наряду с расчетом (<sup>10</sup>) позволили точно установить величину изменения температуры образцов при прохождении одиночных импульсов тока. Смоделировано также тепловое действие тока двумя способами: нагревом образцов переменным током (имея в виду малое собственное действие переменного тока (<sup>10</sup>)) и нагревом образцов двумя спиралями из нихрома, приваренными к обеим головкам образцов.

Для проведения экспериментов использовали кристаллы «чистого» (99,998% Zn с примесью  $\sim 10^{-3}\%$  Cd) и легированного ( $\sim 2 \cdot 10^{-2}\%$  Cd) цинка ориентации  $\chi_0 = 18; 29; 32$  и  $44^\circ$  (угол между плоскостью базиса и осью образца). Длина частей *A* и *B* была одинаковой и составляла 14—15 мм, диаметр  $\sim 1$  мм. Деформация осуществлялась растяжением со скоростью  $\sim 0,1$  мм/мин. Точность определения нагрузок 0,5 г при жесткости пружины динамометра испытательной машины  $K = 3,3 \cdot 10^{-4}$  мм/г. При-

ращение деформации образцов определяли по формуле  $\Delta l = K \cdot \Delta P$ . Температура испытаний  $-196^\circ \text{C}$ . С помощью тиристорного модулятора тока и формирующей линии получали прямоугольные импульсы тока  $500-1800 \text{ а/мм}^2$  длительностью  $1,6 \cdot 10^{-4}$  сек.

На рис. 16 приведены характерные диаграммы растяжения двойных образцов с осцилляциями деформирующего усилия, связанными с прохождением импульсов тока по части А и по части В образцов. Пики, получаемые

Рис. 1. а — двойные образцы, имеющие рабочую деформируемую часть А и нерабочую часть В, которая служит только для пропускания тока; б — диаграмма растяжения кристаллов цинка  $\chi_0 = 29^\circ$  с осцилляциями деформирующего усилия, связанными с прохождением по ним одиночных импульсов тока величиной  $\sim 10^3 \text{ а/мм}^2$  длительностью  $1,6 \cdot 10^{-4}$  сек. в части А и в части В двойных образцов



в случае прохождения тока по части В, обусловлены стимулированием пластической деформации металла пинч-эффектом. Как видно из представленной диаграммы, значительно большие по величине пики возникают в случае прохождения тока по части А, при совместном действии тока и упругих колебаний от пинч-эффекта на пластическую деформацию кристалла.

На рис. 2 приведены зависимости от силы тока величины падения деформирующего усилия  $\Delta P_A(I)$ ,  $\Delta P_B(I)$ , а также разности  $(\Delta P_A - \Delta P_B)$  (3), характеризующей истинную величину электропластического эффекта, включая возможное тепловое действие тока. Из этих данных можно сделать следующие выводы.

1) Пороговое значение  $I_{\text{п}}$  тока, с которого начинает отмечаться макроскопически заметная пластическая деформация металла, составляет для «чистых» кристаллов цинка величину порядка  $I_{\text{п}}' = 400-500 \text{ а/мм}^2$ , а для легированных образцов  $I_{\text{п}}'' = 500-600 \text{ а/мм}^2$ .

2) Помимо указанного возрастания  $I_{\text{п}}$  при легировании происходит также увеличение наклона зависимости  $(\Delta l)_{\text{ист}}$  от величины тока. Такое же возрастание угла наклона графиков наблюдалось также при изменении ориентации кристаллов от  $18$  до  $44^\circ$ , что свидетельствует о связи скачков деформации с трансформацией скоплений дислокаций в базисных плоскостях цинка.

3) линейный ход приведенных на рис. 2 зависимостей свидетельствует о том, что наблюдаемый эффект не связан с тепловым действием тока, поскольку при таком действии должна была бы наблюдаться зависимость  $\Delta P, \Delta l = f(I)$ , близкая к квадратичной.

Во второй части работы уточнено возможное тепловое действие тока путем измерения температуры образцов во время действия одиночных импульсов тока и моделирования теплового действия тока двумя указанными выше способами. Измерения температуры образцов производились с помощью дифференциальных медь-константановых термопар, приваренных к поверхности или зачеканенных в объем образцов. Использовали образцы из рабочих партий по первой части работы, имеющие сопротивление  $20 \cdot 10^{-5}$  ом и прошедшие предварительную деформацию на  $10-15\%$ , и фотокомпенсационный микровольт-микроамперметр Ф116/1 на чувствительных пределах измерений — с ценой деления  $0,1$  мкв. Учитывали и измеряли термопарный эффект Пельтье (охлаждение или нагрев спая током, проходящим по образцу, в зависимости от направления тока). Температурный коэффициент  $\alpha$  изменения термо-э.д.с. определяли по двум реперным точкам — жидкому азоту ( $-195,8^\circ$ ) и жидкому кислороду ( $-182,98^\circ$ ); он оказался равным  $\alpha = 15,91$  мкв/град; точность измерений температуры  $\pm 0,005^\circ$ .

Результаты измерений температуры образцов приведены на рис. 3. Заштрихована область завышенных и заниженных показаний термопар при смене полярности тока за счет эффекта Пельтье. Из этих данных следует, что пороговым значениям тока  $I_{п}=400-600$  а/мм<sup>2</sup> отвечает нагрев образцов цинка не более чем на 0,1–0,3°, что подтверждает приведенный в (10) расчет приращения температуры образцов в импульсах тока. Разница в показаниях термопар на поверхности и в объеме образцов не превы-

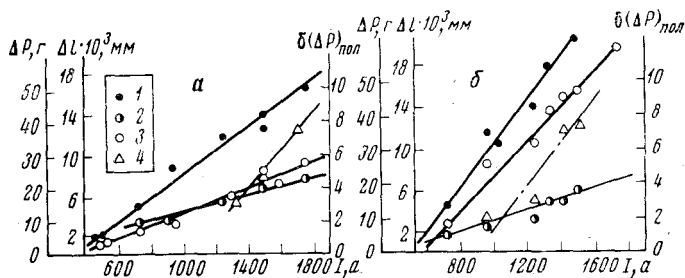


Рис. 2. Зависимость деформирующего усилия  $\Delta P$ , приращения длины образцов  $\Delta l$  в результате прохождения одиночных импульсов тока (1–3), а также полярности электропластического эффекта  $\delta(\Delta P)_{пол}$  (4) от силы тока для кристаллов чистого (а) и легированного ( $2 \cdot 10^{-2}\%$  Cd) (б) цинка;  $\chi_0 = -18^\circ$ ,  $v = 0,1$  мм/мин,  $l_0 \approx 16$  мм,  $T = -196^\circ$ . 1 –  $\Delta P_A$ , 2 –  $\Delta P_B$ , 3 –  $(\Delta P_A - \Delta P_B)$

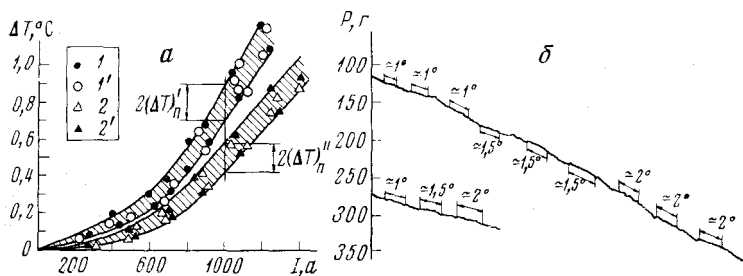


Рис. 3. а – изменение температуры кристаллов цинка, находящихся в жидком азоте, при действии на них одиночными импульсами тока, по измерениям медь-константановыми термопарами в объеме (1, 1') и на поверхности (2, 2') образцов. 1, 2 – моно-Zn ( $2 \cdot 10^{-2}\%$  Cd), 1', 2' – моно-Zn ( $\sim 10^{-3}\%$  Cd); б – диаграммы растяжения кристаллов цинка  $\chi_0 = 29^\circ$  с участками нагрева на 1, 1,5 и  $2^\circ$  С по отношению к окружающему азоту

шает 0,3° с положительным балансом в сторону объема, что свидетельствует об отсутствии заметного влияния скин-эффекта (оттеснения тока к поверхности). На рис. 3 приведены диаграммы растяжения кристаллов цинка с участками нагрева на 1, 1,5 и  $2^\circ$  С по отношению к окружающему жидкому азоту. Нагрев осуществлялся с помощью переменного тока. На представленных диаграммах не обнаруживается скачков, подобных тем, что наблюдаются при прохождении импульсов тока (рис. 1б). Следовательно, тепловое действие тока, как и пинч-эффект в опытах (1, 2), имеет втростепенное значение.

В работе (12) были проведены оценки термического разупрочнения кристаллов. Если воспользоваться взятой из (12) для  $T > 20^\circ$  К температурной зависимостью относительного изменения деформирующего напряжения  $\left( \frac{1}{|\Delta T|} / \frac{|\Delta \sigma|}{\sigma} = 0,2-0,3\% \text{ на } 1^\circ \right)$ , то изменение температуры об-

разцов в наших опытах (при максимальных значениях тока) может приводить к термическому разупрочнению не более чем на 0,4–0,6%. Осцилляции же деформирующего усилия на диаграммах рис. 1 при прохождении тока по части А образцов составляли  $\Delta P=45-50$  г, что дает при среднем уровне деформирующего усилия  $P=250$  г разупрочнение примерно на 20%. Обнаруженная величина, таким образом, намного превышает возможное термическое разупрочнение кристаллов при действии импульсным током.

Отметим также, что результат работы (2) для поликристаллического свинца (5,7% разупрочнения) в работе (12) был сопоставлен с возможным температурным разупрочнением свинца. При этом допущены две ошибки: приращения температуры образцов из работы (2) взяты равными 12–16° (эти значения относятся к области комнатных температур), а не 1–2°, как было бы правильно, поскольку речь идет об азотных температурах; кроме того, использовался приведенный выше коэффициент  $\left( \frac{1}{|\Delta T|} / \frac{|\Delta \sigma|}{\sigma} = -0,2-0,3\% \text{ на } 1 \text{ градус} \right)$ , полученный авторами (12) для монокристаллического, а не для поликристаллического свинца. Указанные обстоятельства послужили, по-видимому, причиной негативных выводов авторов (12) относительно результатов работ (1, 2).

Отметим, что «электронный ветер» вызывает такие изменения в динамике колеблющихся дислокационных сегментов, которые приводят к уменьшению времени преодоления дислокациями препятствий, к срыву скоплений дислокаций с препятствий. Причиной может быть либо изменение электрического взаимодействия заряженных примесей с дислокациями (13), либо возникновение ангармоничности в колебаниях дислокационных сегментов в связи с активным демпфированием их электронами проводимости (или электронными плазменными колебаниями в методике облучения). Механизм изменения электрического взаимодействия заряженных примесей с дислокациями отпадает, так как эффект имеет место также при инжекции в металл пакетов ускоренных электронов (5, 7), когда к образцу не прикладывается потенциал и не может существенно измениться взаимодействие между примесями и дислокациями. Остается механизм срыва дислокаций с препятствий при активном демпфировании сегментов «электронным ветром».

Таким образом, в настоящей работе показано, что пластическая деформация металла, стимулированная импульсами тока нетермической величины  $\sim 10^3$  а/мм<sup>2</sup> при длительности импульсов  $\sim 10^{-4}$  сек., состоит из двух частей: истинной электропластической деформации, в минимальной степени связанной с тепловым действием тока и обусловленной электро-дислокационным взаимодействием, а также деформации, зависящей от пинч-действия импульсного тока, которую можно отнести к второстепенным факторам.

Институт физической химии  
Академии наук СССР  
Москва

Поступило  
27 VIII 1974

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> О. А. Троицкий, Письма ЖЭТФ, т. 10, 18 (1969). <sup>2</sup> О. А. Троицкий, А. Г. Розно, ФТТ, т. 12, 203 (1970). <sup>3</sup> С. Т. Кишкин, А. А. Клыпин, ДАН, т. 211, 325 (1973); т. 216, 771 (1974). <sup>4</sup> В. И. Спицын, О. А. Троицкий, П. Я. Глазунов, ДАН, т. 199, 810 (1971). <sup>5</sup> В. И. Спицын, О. А. Троицкий, П. Я. Глазунов, ДАН, т. 201, 324 (1971). <sup>6</sup> О. А. Троицкий, Л. Г. Майстренко, Физ.-химич. мех. матер., т. 8, 44 (1972). <sup>7</sup> О. А. Троицкий, В. И. Спицын, ДАН, т. 210, 1388 (1973). <sup>8</sup> В. И. Спицын, О. А. Троицкий, Е. В. Гусев, Изв. АН СССР, сер. Металлы, № 2 (1974). <sup>9</sup> О. А. Троицкий, В. И. Спицын, Е. В. Гусев, там же, № 3, 194 (1974). <sup>10</sup> В. И. Спицын, О. А. Троицкий, ДАН, т. 216, 1266 (1974). <sup>11</sup> И. А. Гиндин, И. М. Неклюдов и др., ФТТ, т. 14, 1308 (1972). <sup>12</sup> В. С. Бобров, Ю. А. Осипьян, ФТТ, т. 15, 3266 (1963). <sup>13</sup> Ю. В. Корношин, Физ. мет. и металловед., т. 29, 659 (1970).