

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕЙСТВИЯ ПИНЧ-ЭФФЕКТА ИМПУЛЬСНОГО ТОКА НА ПЛАСТИЧЕСКУЮ ДЕФОРМАЦИЮ МЕТАЛЛА

О.А. Троицкий

Институт машиноведения им А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

E-mail: oatroitsky@rambler.ru

Исследовано влияние динамического пинч-эффекта (ПЭ), создаваемого собственным магнитным полем импульсного тока, на величину электропластического эффекта (ЭПЭ), создаваемого этим видом тока. Используя методику двойных образцов и моделируя действия ПЭ по краю образца, установлено, что ПЭ самостоятельно без участия теплового и электронного действий тока вызывает пластическую деформацию металла.

1. ВВЕДЕНИЕ

Представления о пинч-эффекте перешли в твердое тело из газовой плазмы [1]. По аналогии с плазмой в твердом теле различают как самостоятельные явления Z- и Q-пинч-эффекты [2]. Первый из названных эффектов (Z-пинч) возникает при протекании сильного тока по образцу и обусловлен сжатием плазмы твердого тела собственным магнитным полем тока. Второй эффект (Q-пинч) возникает при сжатии плазмы твердого тела в импульсном продольном магнитном поле, нарастающем во времени.

В 50-х годах прошлого столетия была обнаружена неустойчивость плазменного проводника в поле протекающего по нему тока, которая получила объяснение в работах Леонтовича [4], Шафранова [5], Кадомцева [6] и других авторов [7]. Что касается твердого тела, то вопрос о поведении реальных твердых проводников в собственном магнитном поле тока с учетом их упругих характеристик до 1960 г. вообще не ставился. В 1953 г. Боровик [8] на образцах В_i обнаружил отклонение от закона Ома для плотностей импульсного тока $J = (6...12) \cdot 10^5 \text{ А/см}^2$, длительности импульсов $\tau \approx 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ с}$ при температурах 20,4 и 77 К. Отклонение было значительным – до 30 % при 20,4 К. Автор попытался объяснить эффект увеличением электрического сопротивления образцов в собственном поле тока. Однако моделирование этого эффекта в искусственных магнитных полях и при умеренных плотностях тока привело к выводу, что магнитосопротивлением можно объяснить лишь 20 % наблюдаемого эффекта. В последующем результаты Боровика получили полное объяснение в рамках пинчевания плазмы твердого тела [2].

Динамический пинч-эффект увеличивает пластичность металла и снижает его сопротивление деформированию. Механизм ПЭ заключается в появлении вокруг образца с током кольцевых линий собственного магнитного поля – поперечного поля Холла, действующего на движущиеся заряды электронной плазмы (электроны проводимости) в поперечном направлении и смещающего их к оси проводника. При этом возбуждаются вибрации ионной решетки металла с частотой следования импульсов.

Целью настоящей работы было экспериментальное доказательство возможности воздействия импульсного тока на деформируемый металл посредством возбуждения в деформируемых образцах за счет ПЭ упругих колебаний, способных самостоятельно вызывать пластическую деформацию металла без участия теплового эффекта и электронной части ЭПЭ (например, действия «электронного ветра»).

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для экспериментов использовались кристаллы чистого (99,998 % Zn) и легированного ($2 \cdot 10^{-2} \%$ Cd) цинка, имеющие ориентацию от 18 до 44° (угол между плоскостью базиса и осью образца). Образцы при температуре жидкого азота имели сопротивление $\sim 2 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}$.

Соединением двух кристаллов головками получали двойные образцы, имеющие одинаковую ориентацию в обеих частях (рис. 1). Длина частей А и Б была одинаковой и составляла 16 мм, а диаметр образцов $\sim 1 \text{ мм}$. Головки на деформируемых кристаллах наваривались с помощью электрической спирали.

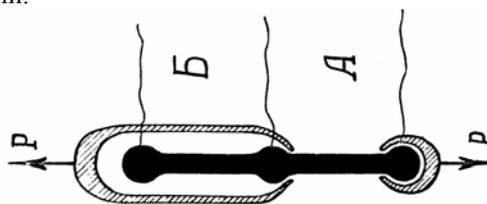


Рис. 1. Схема эксперимента

Деформация осуществлялась растяжением с постоянной скоростью 0,01 см/мин при точности определения нагрузок 1...2 г. Жесткость пружины динамометра испытательной машины составляла $K = 3,3 \cdot 10^{-4} \text{ мм/г}$. Опыты проводились при температуре жидкого азота.

Через двойные образцы в части Б с помощью генератора пропускались импульсы тока плотностью от 500 до 2500 А/мм² при длительности импульсов $\sim 10^{-4} \text{ с}$ и частоте повторения импульсов 0,1...0,2 Гц. Величина импульсного тока определялась с помощью осциллографа С1-15 по падению напряжений на калиброванном

сопротивлении 0,004 Ом. Форма импульсов была прямоугольной. Обратные выбросы отсутствовали.

Время между импульсами выбиралось большим 5...10 с (скважность порядка 0,1) с тем, чтобы на диаграммной записи деформации кристаллов можно было выделить скачки деформирующего усилия ΔP и оценить затем приращения длины кристалла Δl в части А по формуле $\Delta l = K \cdot \Delta P$, где K – жесткость пружины динамометра. Невысокая частота импульсного тока позволяла также избегать резонансных явлений. Температура образцов контролировалась прибором Ф116/2 и системой дифференциальных медь-константановых термопар в различных частях образца. Холодные спаи термопар находились в жидком азоте.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 2 приведены характерные диаграммы растяжения двойных образцов с осцилляциями деформирующего усилия, связанными с прохождением тока по частям А и Б образцов.

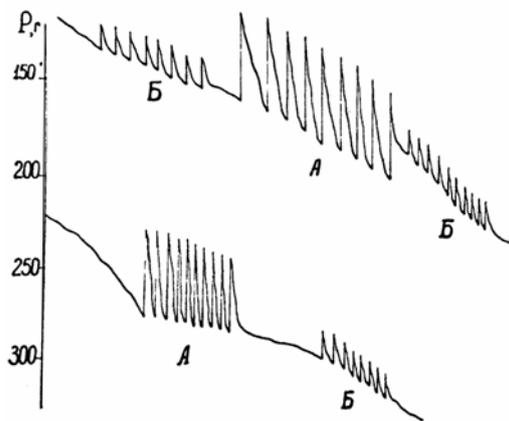


Рис. 2. Диаграммы растяжения двойных монокристаллических образцов цинка $\chi_0 = 32^\circ$ с осцилляциями деформирующего усилия, связанными с прохождением одиночных импульсов тока по деформируемой (А) и недеформируемой (Б) частям образцов

Скачки деформации, получаемые в случае прохождения тока по части Б, обусловлены пластической деформацией кристалла, вызванной ПЭ. Упругие колебания образца, создаваемые ПЭ в части Б двойного образца со скоростью v_1 , близкой к скорости звука, передавались на нижнюю деформируемую часть и вызывали здесь пластическую деформацию кристалла. Скачки деформации в этом случае меньше по величине, чем при прохождении тока по части А. В последнем случае ПЭ суммируется с собственно электрическим действием тока. Вместе с тем обнаруженные пики Б-типа свидетельствуют о существовании пластической деформации металла, обусловленной ПЭ.

На рис. 3 приведены зависимости величины деформирующего напряжения $\Delta \sigma_B$, а также соответствующее приращение длины образцов от

амплитудной силы импульсного тока. Как видно из представленных данных, наблюдается квадратичная зависимость эффекта от силы тока, что указывает на ответственность за наблюдаемое явление ПЭ, который, как известно, квадратично зависит от силы тока. Эффект усиливается на кристаллах с легким базисным скольжением (кривые 1 и 2) и уменьшается на легированных кристаллах (кривая 3).

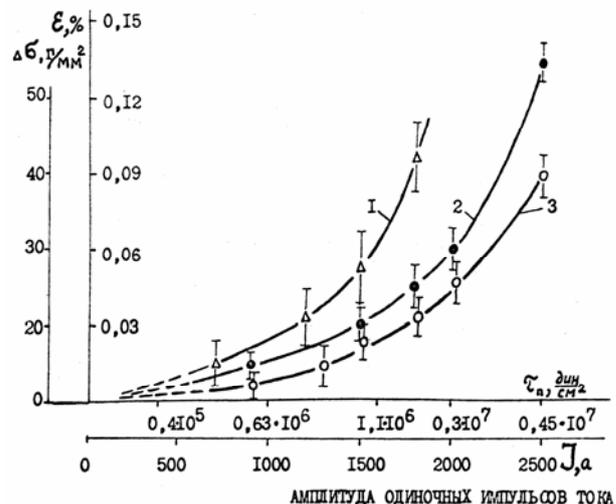


Рис. 3. Зависимость скачка деформирующего напряжения и приращения длины образцов для двух партий кристаллов с легким базисным скольжением (кривые 1 и 2) и одной партии легированных кристаллов (кривая 3)

Было также установлено, что пороговое значение плотности тока, с которого начинаются скачки деформирующего усилия и заметная пластическая деформация кристаллов, составляет для чистых кристаллов цинка $J_n = 400 \dots 500 \text{ А/мм}^2$, а для легированных кадмием кристаллов цинка – $J'_n = 500 \dots 600 \text{ А/мм}^2$.

Приращение длины образцов при электропластической деформации вследствие действия одного импульса тока составляет примерно 10 мкм (при точности измерений 1...2 мкм) или $(6 \dots 7) \cdot 10^{-2} \%$ от начальной длины образцов, что эквивалентно выходу на поверхность кристалла $\sim 10^4 \dots 10^5$ базисных дислокаций.

Установлено также, что помимо возрастания порогового значения тока при легировании происходит увеличение наклона зависимости Δl от величины тока.

Соотношение пондеромоторного пинч-эффекта и ЭПЭ для образцов цинка диаметром ~ 1 мм показано на рис. 4. По оси ординат отложены скальвающие напряжения на плоскости базиса цинка, а по оси абсцисс – плотность тока j .

Видно, что с ростом j сначала преобладает ЭПЭ, а затем более существенным становится пондеромоторный ПЭ. Силу электрон-дислокационного взаимодействия можно представить в виде

$$F = Bv = bnp_F v.$$

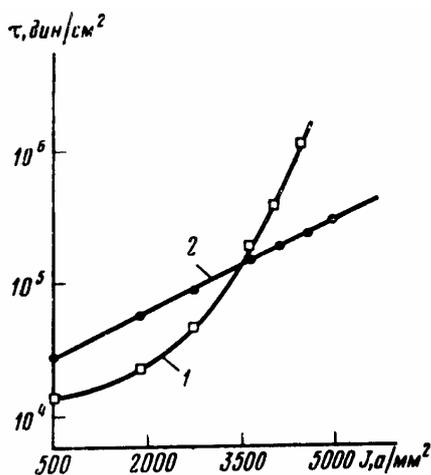


Рис. 4. Соотношение пондеромоторного эффекта (1) и ЭПЭ (2) для кристаллов цинка диаметром ~ 1 мм и длиной ~ 16 мм в зависимости от плотности тока

В эту формулу входят параметры электронного газа (концентрация n и фермиевский импульс p_F электронов) и дислокаций (вектор Бюргера b и скорость дислокаций v). При $b = 2,5 \cdot 10^{-8}$ см, $n = 3,38 \cdot 10^{22}$ эл./см³, $p_F = 0,9 \cdot 10^{-19}$ и $v = 10^5$ см/с (предельные значения скорости дислокаций) на единицу длины дислокаций будет приходиться 7,6 дин/см, а механические напряжения составят $\tau = F/b = 3 \cdot 10^{-8}$ дин/см². Построенный для умеренных скоростей деформации (скоростей дислокаций) график дает, в общем-то, заниженные возможные значения τ (см. рис. 4).

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Практически линейный ход зависимостей на рис. 4 свидетельствует о том, что тепловое действие тока не было ответственно за наблюдаемый эффект. Об этом также свидетельствует тот факт, что пороговые значения тока I'_n при легировании образцов не уменьшились (за счет возможного увеличения тепловыделений), а увеличились.

Следовательно, в работах [9, 10] явление скачкообразной деформации кристаллов цинка включало в себя ПЭ действия тока. Сопутствующий импульсному току ПЭ эквивалентен по своему влиянию приложению к кристаллу осциллирующих напряжений. Известно из [11, 12], что под влиянием осциллирующих напряжений прямолинейные дислокации совершают возвратно-поступательное движение, а дислокационные петли периодически изменяют свой радиус, т.е. расширяются или сжимаются с частотой внешнего осциллирующего напряжения. Закрепленные же по концам дислокационные сегменты испытывают вынужденные колебания около положения равновесия. В этих условиях возрастает вероятность отрыва дислокаций от стопоров. Согласно Мэзону [11] даже малоинтенсивные колебания, не вызывающие работы источников дислокаций, могут изменять спектр длин дислокационных сегментов и

влиять на сопротивление кристаллов деформированию.

Установленное в настоящей работе увеличение пластичности кристаллов под влияние ПЭ действия импульсного тока, вызывающего колебания кристаллической решетки, наиболее вероятно объясняется по Мэзону изменением спектра длин дислокационных сегментов и срывом скоплений дислокаций с препятствий.

Указанные процессы, в свою очередь, снижают сопротивление кристаллов деформированию.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Импульсный ток оказывает на деформируемый металл особое, присущее импульсному току, пондеромоторное действие, обусловленное периодическим сжатием образцов в радиальном направлении собственным магнитным полем тока и возбуждением в образцах упругих колебаний с частотой следования импульсов.

2. Используя методику двойных образцов и моделируя ПЭ по краю образца в ненагруженной его части, в настоящей работе удалось показать, что упругие колебания, возбуждаемые в деформируемых образцах ПЭ, способны самостоятельно вызывать пластическую деформацию металла без участия теплового эффекта и электронной части ЭПЭ (действия «электронного ветра»).

3. При одной и той же плотности тока ПЭ выражен тем ярче, чем больше радиус использованных образцов, а также чем меньше электрическое сопротивление.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.А. Арцимович. *Управляемые термоядерные реакции*. М.: «Физматгиз», 1961, с.347.
2. В.В. Владимиров // *Успехи физических наук*. 1975, т. 117, №1, с. 79.
3. W.H. Bennett // *Phys. Rev.* 1934, v. 45, p. 890.
4. М.А. Леонтович. Физика плазмы и проблемы управляемых термоядерных реакций. I // *Изв. АН СССР*. 1958, с. 110.
5. В.Д. Шафранов // *Атомная энергия*. 1956, т. 5, с. 38.
6. Б.Б. Кадомцев // *Вопросы теории плазмы*. М.: Госатомиздат, 1963, с. 132.
7. P.H. Robert // *Astrophys. J.* 1956, v. 124, p. 430.
8. Е.С. Боровик // *Доклады АН СССР*. 1953, v. 91, с. 771.
9. О.А. Троицкий. Пластическая деформация металла, вызванная пинч-эффектом // *Известия АН СССР*. 1977, сер. № 6, с. 118-122.
10. О.А. Троицкий. Электропластическая деформация стали растяжением и волочением // *Сталь*. 1974, №5, с. 450-459.
11. W. Masoh // *Bell. Syst.* 1955, v. 34, p. 903.
12. Н.А. Тянунина // *Физика деформационного состояния монокристаллов*. Киев: «Наукова думка», 1972, с. 228.

Статья поступила в редакцию 21.07.2011 г.

МОДЕЛЮВАННЯ ДІЇ ПІНЧ-ЕФЕКТУ ІМПУЛЬСНОГО СТРУМУ НА ПЛАСТИЧНУ ДЕФОРМАЦІЮ МЕТАЛУ

О.А. Троїцький

Досліджено вплив динамічного пінч-ефекту (ПЕ), що створюється власним магнітним полем імпульсного струму, на величину електропластичного ефекту (ЕПЕ), що створюється струмом цього виду. Використовуючи методику подвійних зразків і моделюючи дію ПЕ по краях зразків, виявлено, що ПЕ самостійно, без участі теплової та електронної дії струму викликає пластичну деформацію металу.

SIMULATION OF PINCH-EFFECT INFLUENCE OF PULSED CURRENT ON PLASTIC DEFORMATION OF METAL

O.A. Troitskyi

We researched the dynamic pinch-effect (PE) influence generated by own magnetic field of pulsed current on value of electroplastic effect (EPE). Using double-specimen technique and simulating PE effect over the specimen edge we find out that PE generates the plastic deformation of metal without thermal and electron effect of current.