

УДК 538.945:539.214

PACS: 83.50.-v Деформация и течение материалов

83.60.Wc Нестабильность течения

## Воздействие импульсов электрического тока плотностью до $2,3 \cdot 10^{10} \text{ А} \cdot \text{м}^{-2}$ на деформацию меди

В.П. Лебедев, С.В. Савич

*Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, пл. Свободы, 4,*

*г. Харьков, 61077, Украина*

*victor.p.lebedev@univer.kharkov.ua*

Изучена деформация поликристаллической меди в условиях прохождения импульсов электрического тока плотностью до  $\sim 2,3 \cdot 10^{10} \text{ А} \cdot \text{м}^{-2}$ . Скачкообразное снижение деформирующего напряжения  $\delta\sigma_{\text{ток}}$  наблюдается как в упругой области нагрузок, так и на стадии пластического течения. Вблизи предела текучести величина  $\delta\sigma_{\text{ток}}$  линейно увеличивается до  $\sim 10^2$  МПа с ростом плотности тока до  $2,3 \cdot 10^{10} \text{ А} \cdot \text{м}^{-2}$ . Анализ зависимости  $\delta\sigma_{\text{ток}}(\sigma)$  позволил выделить разупрочняющее действие тока  $\delta\sigma_{\text{ток}}^{\text{пл}}$  на стадии пластического течения.

Рассмотрены различные факторы воздействия импульса электрического тока на скачкообразное снижение деформирующего напряжения при упругой и пластической деформациях металла.

**Ключевые слова:** импульс электрического тока, упругая и пластическая деформация, скачок деформирующего напряжения.

Вивчена деформація полікристалічної міді в умовах проходження імпульсів електричного струму щільністю до  $\sim 2,3 \cdot 10^{10} \text{ А} \cdot \text{м}^{-2}$ . Стрибокподібне зниження деформуючого напруги  $\delta\sigma_{\text{стр}}$  спостерігається як у пружною області навантажень, так і на стадії пластичної течії. Поблизу межі текучості величина  $\delta\sigma_{\text{стр}}$  лінійно збільшується до  $\sim 10^2$  МПа із зростанням щільності струму до  $2,3 \cdot 10^{10} \text{ А} \cdot \text{м}^{-2}$ . Аналіз залежності  $\delta\sigma_{\text{стр}}(\sigma)$  дозволив виділити знемцнювальну дію струму  $\delta\sigma_{\text{стр}}^{\text{пл}}$  на стадії пластичної течії.

Розглянуто різні чинники впливу імпульсу електричного струму на стрибкоподібне зниження деформуючого напруги при пружною і пластичної деформації металу.

**Ключові слова:** імпульс електричного струму, пружна і пластична деформація, стрибок деформуючого напруги.

Studied the deformation of polycrystalline copper in the passage of pulses of electric current density up to  $\sim 2,3 \cdot 10^{10} \text{ А} \cdot \text{м}^{-2}$ . The abrupt decrease in flow stress  $\delta\sigma_{\text{cur}}$  observed both in the elastic region of loading and at the stage of plastic flow. Near the yield stress value increases linearly  $\delta\sigma_{\text{cur}}$  to  $\sim 10^2$  MPa with increasing current density  $2,3 \cdot 10^{10} \text{ А} \cdot \text{м}^{-2}$ . Analysis of the relationship  $\delta\sigma_{\text{cur}}(\sigma)$  allowed to identify softening effect of the current  $\delta\sigma_{\text{cur}}^{\text{pl}}$  stage of plastic flow.

The various factors of influence on the pulse of electric current abrupt decrease in flow stress of the elastic and plastic deformation of metals.

**Keywords:** pulse of electric current, the elastic and plastic deformation, flow stress jump.

### Введение

Механические характеристики металла определяются его упругими постоянными и состоянием дефектной структуры (искажения кристаллической решетки различного типа, их распределение, взаимодействие и др.), а также условиями испытаний (скорость деформирования, температура и др.). Однако, указанные факторы не всегда являются единственно определяющими и на процесс движения дислокаций значительное влияние могут оказывать различного рода элементарные возбуждения кристаллической решетки - квазичастицы (фононы, электроны

проводимости и др.). Так, при низких температурах у металлов в результате перехода в сверхпроводящее состояние происходит уменьшение вязкости газа свободных электронов и снижение силы торможения дислокаций [1]. Другая возможность воздействия на кристалл может быть реализована потоком ускоренных электронов в импульсе электрического тока [2, 3], облучением высокоэнергетичными электронами [4, 5] и др.

В настоящее время накоплен определенный объем экспериментальных данных по воздействию электрического тока плотностью  $j \sim 10^9 \text{ А} \cdot \text{м}^{-2}$  на пластическое течение ряда чистых металлов и сплавов

(электропластическая деформация - ЭПД) [6]. Однако, значительный разогрев кристаллической решетки по-прежнему оставляет невыясненными механизмы, контролируемые явление на микроскопическом уровне.

В связи с этим целесообразно дальнейшее изучение явления при более высоких плотностях электрического тока, выделение вклада разогрева джоулевым теплом и других сопутствующих воздействий на деформируемый металл. Все это позволит разделить влияние термических и атермических процессов на открепление дислокаций от стопоров и их перемещение в кристаллической решетке.

### Объект и методика эксперимента

Объектом исследования являлись поликристаллические образцы технической - чистой меди Cu (99,5%). Перед испытаниями цилиндрические образцы диаметром  $d=(0,41-1,54)$  мм и длиной 30 мм отжигали в вакууме при  $400^{\circ}\text{C}$  в течение 1 ч.

Деформацию осуществляли путем одноосного растяжения с постоянной скоростью удлинения  $v_{шт} = 4$  мкм·с<sup>-1</sup> при комнатной температуре. Нагрузку на образце  $P$  определяли в зависимости от времени деформации  $t$  по величине разбаланса тензометрического моста сопротивления. Для регистрации сигнала во времени использовали фотоэлектронный усилитель Ф-116 и электронный самопишущий потенциометр КСП-4 (временное разрешение 1с).

Относительное удлинение образца находили из соотношения  $\varepsilon = v_{шт} \cdot t / l$  ( $l$  - начальная длина рабочей части образца) с погрешностью  $\pm 0,1\%$ .

Деформирующее напряжение рассчитывали из соотношения  $\sigma = P \cdot (1 + \varepsilon) / S$  ( $S$  - начальное сечение образца) с погрешностью  $\pm 0,5 \cdot 10^4$  Па.

Для создания больших плотностей электрического тока в деформируемом образце использовали генератор, который состоял из батареи электролитических конденсаторов емкостью  $2 \cdot 10^3$  мкФ, зарядного устройства, вакуумного разрядника и электронной схемы управления частоты следования импульсов [7]. В одиночном импульсе колоколообразной формы достигалась сила тока  $\sim 5$  кА, а его длительность составляла  $\tau = 2 \cdot 10^{-4}$  с.

### Результаты исследований и обсуждение

Для определения влияния импульсов электрического тока на деформационные характеристики металла сопоставляли кривые нагружения (растяжение с постоянной скоростью перемещения штока разрывной машины) в координатах

нагрузка  $P$ - время  $t$ , полученные при отсутствии ( $j = 0$ ) и наличии электрического тока ( $j \neq 0$ ) (рис.1).

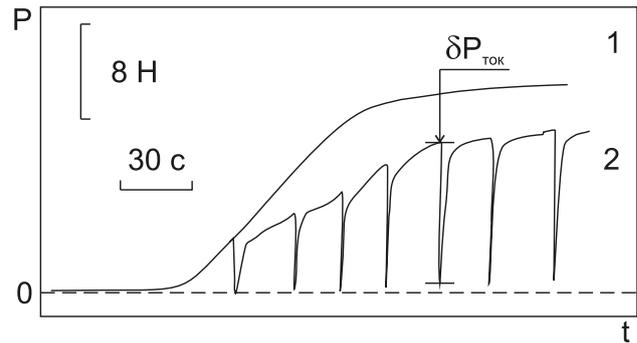


Рис. 1. Начальные участки диаграммы нагрузка  $P$  - время  $t$  в области упругого и пластического нагружения образцов меди диаметром 0,41 мм. при отсутствии (1) и наличии (2) импульсов электрического тока плотностью  $j = 2,3 \cdot 10^{10}$  А·м<sup>-2</sup>.

Начальный участок кривой  $P(t)$  поликристаллической меди (99,5 %) при отсутствии электроимпульсного воздействия (рис.1, зависимость 1) позволяет определить: эффективный модуль упругости в системе образец - подвижный шток нагружающего устройства ( $\langle E \rangle$ ), предел текучести ( $\sigma_0$ ), коэффициент деформационного упрочнения ( $\theta = d\sigma / d\varepsilon$ ).

Воздействие импульсов электрического тока плотностью  $j = 2,3 \cdot 10^{10}$  А·м<sup>-2</sup> со скважностью  $\sim 20$  с на упругом и пластическом участке кривой нагружения показано на рис. 1 (зависимость 2).

Прохождение импульса тока приводит к скачкообразному снижению уровня нагрузки на образце на величину  $\delta P_{ток}$  как в упругой, так и в пластической области нагружения, что согласуется с ранее приведенными данными для ряда чистых металлов в диапазоне  $j < 5 \cdot 10^9$  А·м<sup>-2</sup> [3]. В упругой части величина скачка нарастает с ростом приложенной нагрузки до достижения предела текучести и  $\delta P_{ток} = f(P)$ . При переходе к пластическому течению металла увеличение  $\delta P_{ток}$  с ростом  $P$  происходит менее интенсивно. Относительное снижение нагрузки может достигать  $(\delta P_{ток} / P) \sim 0,9$ .

Прохождение импульсов электрического тока приводит также к снижению эффективного модуля упругости  $\langle E_{ток} \rangle / E \sim 0,5$  для  $P(t)$  между импульсами тока и  $\langle E_{ток} \rangle / E \sim 0,1$  по нижней огибающей скачков нагрузки, а также предела текучести ( $\sigma_{0ток} / \sigma_0 \sim 0,8$ ).

Рассмотрим на уровне предела текучести металла  $\sigma \sim \sigma_0$  (переход от упругого к пластическому деформированию материала) изменение величины скачка деформирующего напряжения  $\delta \sigma_{ток}$ , созданного импульсом тока, в зависимости от его плотности -  $j$  (рис. 2).

Всю зависимость  $\delta \sigma_{ток}(j)$  можно представить двумя линейными участками: на первом наблюдается

нарастание скачка деформирующего напряжения до 6 МПа при  $j = 6 \cdot 10^9 \text{ А} \cdot \text{м}^{-2}$ , а для второго имеет место увеличение  $\delta\sigma_{\text{ток}}$  от 6 МПа до 92 МПа в диапазоне  $j = (6 \cdot 10^9 - 2,3 \cdot 10^{10}) \text{ А} \cdot \text{м}^{-2}$ .

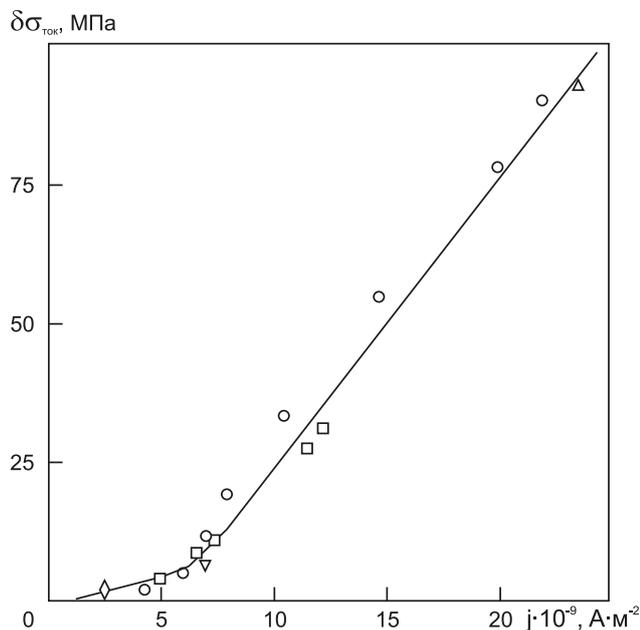


Рис. 2. Величина скачка деформирующего напряжения  $\delta\sigma_{\text{ток}}$  (на уровне  $\sim \sigma_0$ ) в зависимости от плотности тока  $j$  для  $d$ , мм: 0,41 ( $\Delta$ ); 0,53 ( $\circ$ ); 0,71 ( $\square$ ); 0,95 ( $\nabla$ ); 1,54 ( $\diamond$ ).

Поскольку скачкообразное снижение деформирующего напряжения на образце при действии импульса электрического тока наблюдается вблизи предела текучести как на упругой, так и пластической части кривой нагружения  $\sigma(t)$ , то, используя зависимость  $\delta\sigma_{\text{ток}}(\sigma)$ , выделим обратимую и необратимую компоненты разупрочнения металла.

На рис.3 показано изменение величины  $\delta\sigma_{\text{ток}}$  от уровня действующего напряжения для трех значений плотности электрического тока для образцов меди диаметром 0,53 мм. В упругой области нагружения величина скачка монотонно нарастает с увеличением  $\sigma$  и при переходе к пластическому течению (на рис.3 отмечено вертикальной стрелкой) наблюдается более интенсивное разупрочнение металла. Экстраполяция участка упругого нагружения  $\delta\sigma_{\text{ток}}(\sigma)$  на область за пределом текучести  $\sigma_0$  (пунктирная линия) позволяет выделить величину дополнительного разупрочнения в пластической области деформаций -  $\delta\sigma_{\text{ток}}^{\text{пл}}$ . Снижение деформирующей нагрузки металла в пластической части на  $\delta\sigma_{\text{ток}}^{\text{пл}}$  связано с изменением динамики его дислокационной системы в результате прохождения импульса электрического тока. Величина этого разупрочнения составляет  $\delta\sigma_{\text{ток}}^{\text{пл}} / \delta\sigma_{\text{ток}}^{\text{упр}} \sim 0,1$  и зависит от плотности электрического тока.

Изменение величины  $\delta\sigma_{\text{ток}}^{\text{пл}}$  для цилиндрических

образов меди разного диаметра от плотности электрического тока приведено на рис.4.

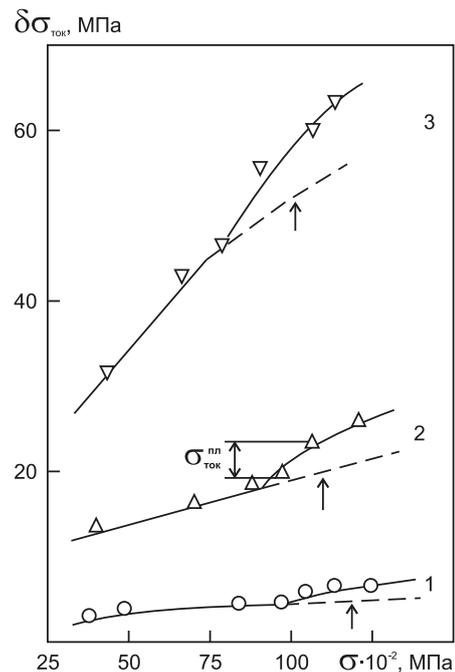


Рис.3 Выделение разупрочняющего действия электрического тока в пластической области нагружения  $\delta\sigma_{\text{ток}}^{\text{пл}}$  поликристаллической меди (диаметр 0,53 мм) и плотностях  $j$ ,  $10^9 \text{ А} \cdot \text{м}^{-2}$ : 4,3 (1); 8,2 (2); 14,3 (3).

Проанализируем факторы, которые могут обуславливать экспериментально наблюдаемый скачкообразное снижение деформирующего напряжения  $\delta\sigma_{\text{ток}}$  как в упругой, так и пластической области деформаций металла.

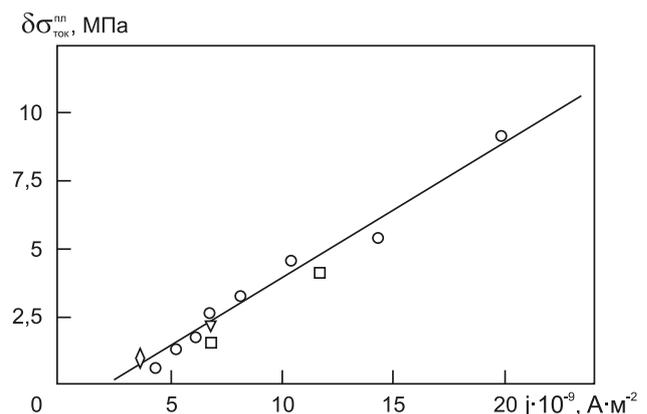


Рис. 4 Снижение деформирующего напряжения меди в пластической части  $\delta\sigma_{\text{ток}}^{\text{пл}}$  в зависимости от плотности электрического тока  $j$ . Обозначения диаметров образцов те же, что и на рис. 2.

В приближении адиабатического нагрева при плотности электрического тока  $j$  оценим повышение температуры единичного объема медного образца из соотношения

$$\Delta T = (\rho \cdot \langle \tau \rangle \cdot c_p^{-1} \cdot D^{-1}) \cdot \langle j \rangle^2, \quad (1)$$

где удельное электрическое сопротивление  $\rho = 1,73 \cdot 10^{-8}$  Ом·м (без учета температурной зависимости); длительность импульса колоколообразной формы на уровне 0,7 j составляет  $\langle \tau \rangle = 1,4 \cdot 10^{-4}$  с; удельная теплоемкость  $c_p = 3,85 \cdot 10^2$  Дж·кг<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup> (без учета температурной зависимости); плотность  $D = 8,93 \cdot 10^3$  кг·м<sup>-3</sup> [8]. Тогда для усредненных значений  $\langle j \rangle = 0,7 \cdot j = (0,5 \text{ и } 2,3) \cdot 10^{10}$  А·м<sup>-2</sup> повышение температуры  $\Delta T$  составит соответственно 9 и 180 К.

При нагружении до  $\sigma_y < \sigma_0$  уровень деформирующего напряжения определяется эффективным модулем упругости в системе образец - шток нагружающего устройства  $\langle E \rangle$  и упругой деформацией образца  $\epsilon_y$  ( $j = 0$ ). Прохождение импульса тока ( $j \neq 0$ ) приводит к снижению  $\sigma_y$  в результате действия различных факторов: термического разогрева металла -  $\delta\sigma_\alpha$ , взаимодействия тока с наведенным собственным магнитным полем (пинч - эффект) -  $\delta\sigma_\Pi$  и др. Результирующее снижение уровня деформирующего напряжения в упругой части (за время импульса  $\tau \sim 10^{-4}$  с расстояние между системой крепления образца и динамометром остается практически неизменным) возникает за счет добавочных удлинений, которые создаются термическим расширением и пинч-эффектом.

Скачкообразное снижение деформирующего напряжения за счет термического расширения определяется как

$$\delta\sigma_\alpha = \langle E \rangle \cdot \alpha \cdot \Delta T, \quad (2)$$

а для пинч-эффекта -

$$\delta\sigma_\Pi = 0,5 \cdot \mu_0 \nu \cdot j^2 \cdot d^2 / 8. \quad (3)$$

Для цилиндрического образца меди диаметром  $d = 4,1 \cdot 10^{-4}$  м; магнитной проницаемости  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ ; коэффициенте Пуассона  $\nu \approx 0,3$ ; эффективном модуле упругости  $\langle E \rangle$  ( $j = 0$ )  $\approx 1 \cdot 10^{10}$  Па; коэффициенте линейного расширения  $\alpha$  (300 К)  $= 1,7 \cdot 10^{-5}$  К<sup>-1</sup> (без учета температурной зависимости) [8] и  $\Delta T = 9$  и 180 К суммарное действие этих составляющих (соотношения (2) и (3)) соответственно равно (1,7- 34) МПа,

При переходе к пластическому течению металла ( $\sigma > \sigma_0$ ) общий уровень деформирующего напряжения  $\sigma$  ( $j = 0$ )  $= \sigma_d + \sigma_r$ , ( $\sigma_d$  определяется дефектной структурой в исходном и деформированном состоянии металла, а также температурной компонентой  $\sigma_r$ ) при наличии электрического тока снижается на  $\delta\sigma_{\text{ток}}^{\text{уп}} = \delta\sigma_\alpha + \delta\sigma_\Pi$  и  $\delta\sigma_{\text{ток}}^{\text{нл}}$

$$\delta\sigma_{\text{ток}}(\epsilon, j \neq 0) = \delta\sigma_{\text{ток}}^{\text{уп}} + \delta\sigma_{\text{ток}}^{\text{нл}}. \quad (4)$$

Для  $j = (0,5 \text{ и } 2,3) \cdot 10^{10}$  А·м<sup>-2</sup> соответственно  $\delta\sigma_{\text{ток}}^{\text{нл}} = (1,5 \text{ и } 10,5)$  МПа (рис.4), а  $\delta\sigma_{\text{ток}}(\epsilon, j \neq 0) = (3,2 \text{ и } 44,5)$  МПа, что в  $\sim (1,4 - 2,6)$  раза меньше экспериментальных значений  $\delta\sigma_{\text{ток}} = (4,5 \text{ и } 92)$  МПа (рис. 2).

Столь существенное различие в

экспериментальных и расчетных значениях  $\delta\sigma_{\text{ток}}$  не может быть в полной мере объяснено заниженными оценками  $\Delta T$ ,  $\delta\sigma_\alpha$  и  $\delta\sigma_\Pi$ .

В связи с этим связывающим звеном в согласовании приведенных оценок может быть наличие ряда неучтенных факторов воздействия электрического тока на кристаллическую решетку металла. Это может быть снижение эффективного модуля упругости кристаллической решетки меди в результате уменьшения сил связи между атомами, перестройки исходной дефектной структуры, возникновение колебаний в системе шток нагружающего устройства - образец [3, 9], генерации «горячими» электронами объемных фононов и фононов с частотами больше или порядка дебаевской частоты [10].

### Выводы

1. Прохождение импульсов электрического тока ( $\tau \sim 10^{-4}$ с,  $j \sim (0,1 - 2,3) \cdot 10^{10}$  А·м<sup>-2</sup>) через цилиндрические образцы меди диаметром - (0,41 - 1,54) мм в процессе их деформирования приводит к скачкообразному снижению деформирующего напряжения как в упругой, так и в пластической области нагружения ( $\delta\sigma_{\text{ток}} \sim (1 - 90)$  МПа).
2. Выделенное разупрочнения металла в пластической области деформирования  $\delta\sigma_{\text{ток}}^{\text{нл}}$  составляет  $\sim 0,1 \delta\sigma_{\text{ток}}$ .
3. Величины  $\delta\sigma_{\text{ток}}$  и  $\delta\sigma_{\text{ток}}^{\text{нл}}$  увеличиваются по линейному закону с ростом плотности тока.

1. В.В Пустовалов. ФНТ **32**, 1, 3 (2006).
2. О.А. Троицкий. Письма в ЖЭТФ **10**, 18 (1969).
3. A.F. Sprecher, S.L. Mannan, H. Conrad. Acta Metall. **34**, 7, 1145 (1986).
4. О.А. Троицкий, В.И. Лихтман. Докл. АН СССР **148**, 2, 332 (1963).
5. В.И. Дубинко, А.Н. Довбня, В.А. Кушнир, В.В. Митроченко, И.В. Ходак, В.П. Лебедев, В.С. Крыловский, С.В. Лебедев, В.Ф. Клепиков. ВАНТ **54**, 3, 140 (2010).
6. О.А. Троицкий, Ю.В. Баранов, Ю.С. Аврамов, А.Д. Шляпин. Физические основы и техника обработки современных материалов. М.- И., (2004). 590 с.
7. В.П. Лебедев, В.П. Воинов. ПТЭ, №4, 88 (1975).
8. М.П. Малков, И.Б. Данилов, А.Г. Зельдович, А.Б. Фрадков. Справочник по физико-техническим основам глубокого охлаждения, Энергоатомиздат, М.(1985).416 с.
9. О.А. Троицкий. ВАНТ **98**, 4, 124 (2011).
10. В.И. Дубинко, В.И. Карась, В.Ф. Клепиков, П.Н. Остапчук, И.Ф. Потапенко. ВАНТ **94**, 4, 158 (2009).