

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, контролирующие 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°C в течение 1 ч.

Деформацию осуществляли путем одноосного растяжения с постоянной скоростью удлинения $v_{шт} = 4$ мкм·с⁻¹ 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 ~ 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).

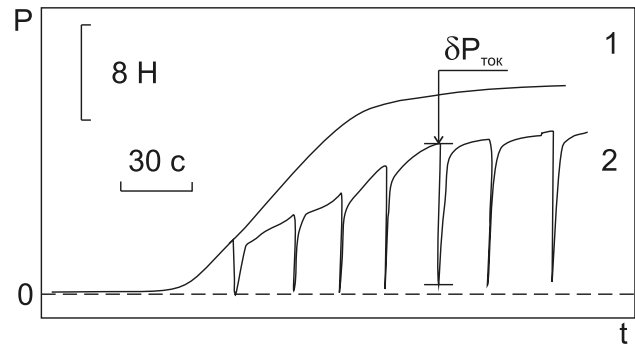


Рис 1. Начальные участки диаграммы нагрузка P - время t в области упругого и пластического нагружения образцов меди диаметром 0,41 мм. при отсутствии (1) и наличии (2) импульсов электрического тока плотностью $j = 2,3 \cdot 10^{10}$ А·м⁻².

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 (σ_0), коэффициент деформационного упрочнения ($\theta = d\sigma / d\varepsilon$).

Воздействие импульсов электрического тока плотностью $j = 2,3 \cdot 10^{10}$ А·м⁻² со скважностью ~ 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⁻² [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 $j = (6 \cdot 10^9 - 2,3 \cdot 10^{10}) \text{ А} \cdot \text{м}^{-2}$.

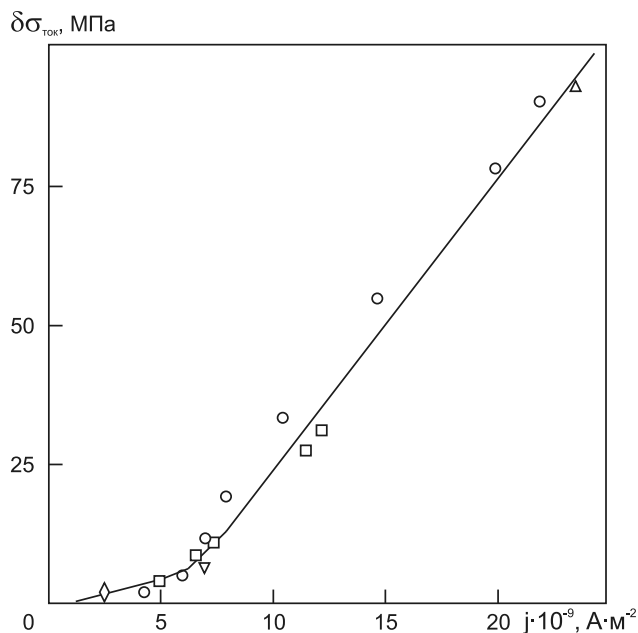


Рис. 2. Величина скачка деформирующего напряжения $\delta\sigma_{\text{ток}}$ (на уровне $\sim \sigma_0$) в зависимости от плотности тока j для d , мм: 0,41 (Δ); 0,53 (\circ); 0,71 (\square); 0,95 (∇); 1,54 (\diamond).

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 σ 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 σ_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.

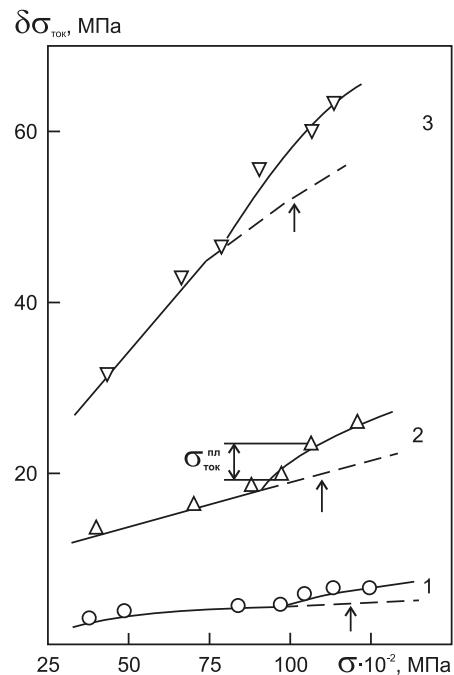


Рис.3 Выделение разупрочняющего действия электрического тока в пластической области нагружения $\delta\sigma_{\text{ток}}^{\text{пл}}$ поликристаллической меди (диаметр 0,53 мм) и плотностях j , $10^9 \text{ А} \cdot \text{м}^{-2}$: 4,3 (1); 8,2 (2); 14,3 (3).

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

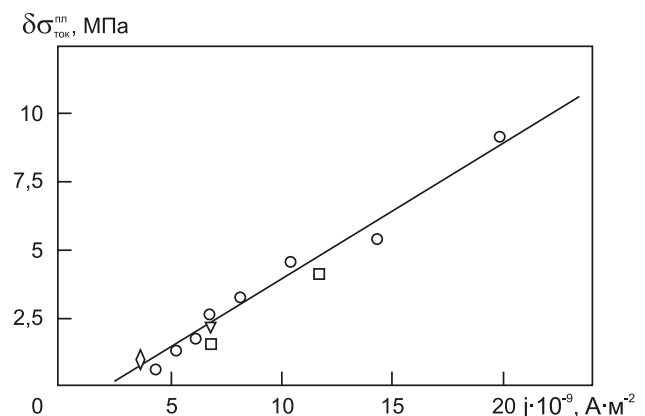


Рис. 4 Снижение деформирующего напряжения меди в пластической части $\delta\sigma_{\text{ток}}^{\text{пл}}$ в зависимости от плотности электрического тока j . Обозначения диаметров образцов те же, что и на рис. 2.

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⁻¹·К⁻¹ (без учета температурной зависимости); плотность $D = 8,93 \cdot 10^3$ кг·м⁻³ [8]. Тогда для усредненных значений $\langle j \rangle = 0,7 \cdot j = (0,5 \text{ и } 2,3) \cdot 10^{10}$ А·м⁻² повышение температуры ΔT 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 ϵ_y ($j = 0$). Прохождение импульса тока ($j \neq 0$) приводит к снижению σ_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 α (300 К) $= 1,7 \cdot 10^{-5}$ К⁻¹ (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 σ ($j = 0$) $= \sigma_d + \sigma_r$, (σ_d определяется дефектной структурой в исходном и деформированном состоянии металла, а также температурной компонентой σ_r) при наличии электрического тока снижается на $\delta\sigma_{\text{ток}}^{\text{упр}} = \delta\sigma_\alpha + \delta\sigma_\Pi$ и $\delta\sigma_{\text{ток}}^{\text{пл}}$

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

Для $j = (0,5 \text{ и } 2,3) \cdot 10^{10}$ А·м⁻² соответственно $\delta\sigma_{\text{ток}}^{\text{упр}} = (1,5 \text{ и } 10,5)$ МПа (рис.4), а $\delta\sigma_{\text{ток}}^{\text{пл}}(\epsilon, j \neq 0) = (3,2 \text{ и } 44,5)$ 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 ΔT , $\delta\sigma_\alpha$ 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⁻²) 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 $\delta\sigma_{\text{ток}}^{\text{пл}}$ составляет $\sim 0,1 \delta\sigma_{\text{ток}}$.
3. Величины $\delta\sigma_{\text{ток}}$ и $\delta\sigma_{\text{ток}}^{\text{пл}}$ 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).