

УПРАВЛЕНИЕ ПЛАСТИЧНОСТЬЮ МЕТАЛЛОВ
СЛАБЫМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ВОЗДЕЙСТВИЯМИ

Экспериментально исследовано влияние электрического потенциала на пластичность меди. Установлена зависимость параметра пластичности меди от электрического потенциала φ для области значений $-3 \text{ В} < \varphi < 3 \text{ В}$. Для значений φ , равных 0,2, 0,6 и 3 В, определены времена релаксации параметра пластичности τ при отключении от образца электрического потенциала, создаваемого источником постоянного тока. Обнаружено, что параметр пластичности S_u зависит от массы присоединенного Zr, причем эта зависимость имеет экспоненциальный характер.

Ключевые слова: пластичность, электрический потенциал, медь.

Одна из главных задач физического материаловедения – установление связи между структурой и пластическими свойствами, а также изучение механизмов управления пластической деформацией поликристаллов различными воздействиями. В связи с этим разработка принципов регулирования пластичностью металлов и сплавов с помощью различных внешних энергетических воздействий представляет большой научный и практический интерес.

Пластичность определяется действием многих факторов. С одной стороны, она зависит от структуры и температурно-скоростных условий деформации, т. е. является структурно-чувствительным свойством твердого тела, а с другой – зависит от схемы напряженного состояния и механики течения [1].

Хорошо известно, что изменение электрического потенциала поверхности контролирует многие практически важные процессы: коррозию в газовых и жидких средах, фреттингкоррозию, коррозию под напряжением, износ и выносливость в агрессивных средах и пр. [2]. Влияние электрических потенциалов на пластическое течение металлических систем изучено в значительно меньшей степени. Наиболее последовательно оно представлено в работах [3–5]. Важно подчеркнуть, что это воздействие не является высокоэнергетическим, изменение потенциала редко превышало 1 В, а влияние было весьма существенным.

К сожалению, не только физическая природа явления, но и сама феноменология к настоящему времени до конца не выяснены.

Поскольку механические свойства материалов чувствительны к состоянию тонких приповерхностных слоев [2; 6; 7], можно ожидать, что изменение плотности поверхностной энергии, вызванное электрическим потенциалом, может существенно сказаться на такой характеристике металла, как параметр пластичности (который, как будет показано, связан с микротвердостью [8]).

Целью настоящей работы является изучение влияния электрического потенциала на пластичность поликристаллической меди.

На практике пластичность обычно оценивается по удлинению или поперечному сужению до разрушения, что не совсем соответствует ее определению, поэтому авторами [8] предложено оценивать пластичность через параметр, учитывающий долю пластической деформации в общей деформации:

$$\delta = \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_t} = \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_p + \varepsilon_e} = 1 - \frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_t},$$

где $\varepsilon_p, \varepsilon_e, \varepsilon_t$ – пластическая, упругая и общая деформация.

В настоящей работе параметр пластичности определялся косвенным методом с использованием методики, позволяющей связать эволюцию параметра пластичности с изменениями значений микротвер-

дости, происходящих при различных воздействиях.

Выражение для средней упругой деформации на контактной площадке индентор-образец в направлении приложенной к индентору нагрузки имеет вид [8]

$$\varepsilon_e = \frac{HM}{E}(1 - \nu_1 - 2\nu_1^2),$$

где HM – твердость по Мейеру (рассматривается как среднее контактное давление); ν_1 – коэффициент Пуассона для данного материала; E – модуль Юнга.

Общая деформация для пирамидальных инденторов определяется по формуле

$$\varepsilon_t = -\ln \sin \gamma, \quad (1)$$

где γ – угол между осью пирамиды и ее гранью. Тогда характеристика пластичности, определенная методом микроиндентирования,

$$\delta = 1 - \frac{HM}{E\varepsilon_t}(1 - \nu_1 - 2\nu_1^2). \quad (2)$$

Подставляя (1) в (2) и учитывая, что $HM = HV / \sin \gamma$, получаем, что

$$\delta = 1 + \frac{1}{\sin \gamma \cdot \ln \sin \gamma}(1 - \nu_1 - 2\nu_1^2) \frac{HV}{E}. \quad (3)$$

Так как для пирамидального индентора Виккерса $\gamma = 68^\circ$ [9], то, подставляя это значение в (3), получаем:

$$\delta = 1 - 14,3(1 - \nu_1 - 2\nu_1^2) \frac{HV}{E}.$$

Исследования выполнены при комнатной температуре на предварительно рекристаллизованных медных образцах. Измерения микротвердости металлов HV осуществлялись на микротвердомере ПМТ-3 с нагрузкой на индентор 30 г и временем выдержки

18 с. Для обработки данных использовались стандартные методы математической статистики [10]. Каждая точка на представленных далее зависимостях получена по результатам усреднения и статистической обработки не менее 30 измерений; во всех случаях вычислялась средняя квадратичная ошибка.

Как и в [6], на исследуемые образцы воздействовали:

а) электрическим потенциалом, непосредственно подаваемым на образцы от источника постоянного тока Б5-43А (рис. 1, а);

б) электрическим потенциалом, возникающим из-за контактной разности потенциалов при присоединении металлов с отличной от исследуемого электронной плотностью (рис. 1, б) [11].

Подведение электрического потенциала обеспечивалось медным проводом диаметром 0,1 мм.

При первом способе воздействия к испытываемому образцу от источника постоянного напряжения подводился определенный электрический потенциал. Его величина менялась как по величине, так и по знаку в различных сериях экспериментов. Потенциал постепенно наращивался от 0 до 3 В (по модулю).

Зависимость параметра пластичности показана на рис. 2. Как и при испытаниях на ползучесть [6], график зависимости симметричен относительно оси ординат. Видно, что более эффективны малые значения потенциала, так как уже при $\varphi > 1$ В скорость уменьшения параметра пластичности существенно замедляется.

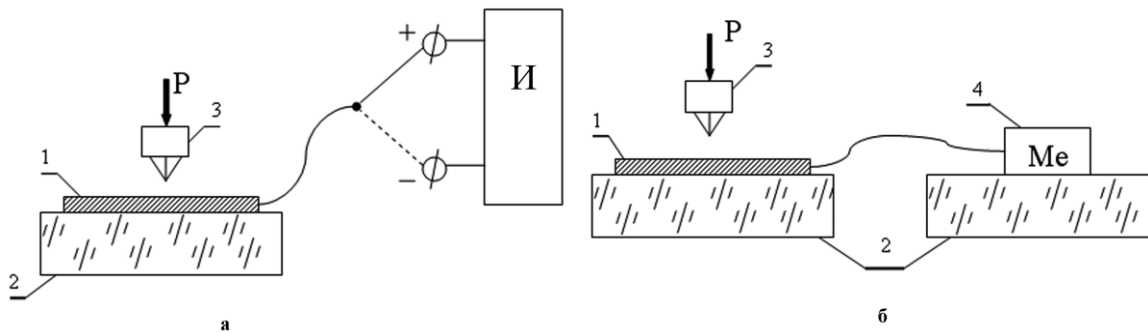


Рис. 1. Схема подачи электрического потенциала на образец при измерении микротвердости от источника постоянного тока (а); при подключении металла (б): 1 – образец; 2 – изоляционный слой; 3 – индентор; 4 – подключаемый металл; И – источник постоянного тока

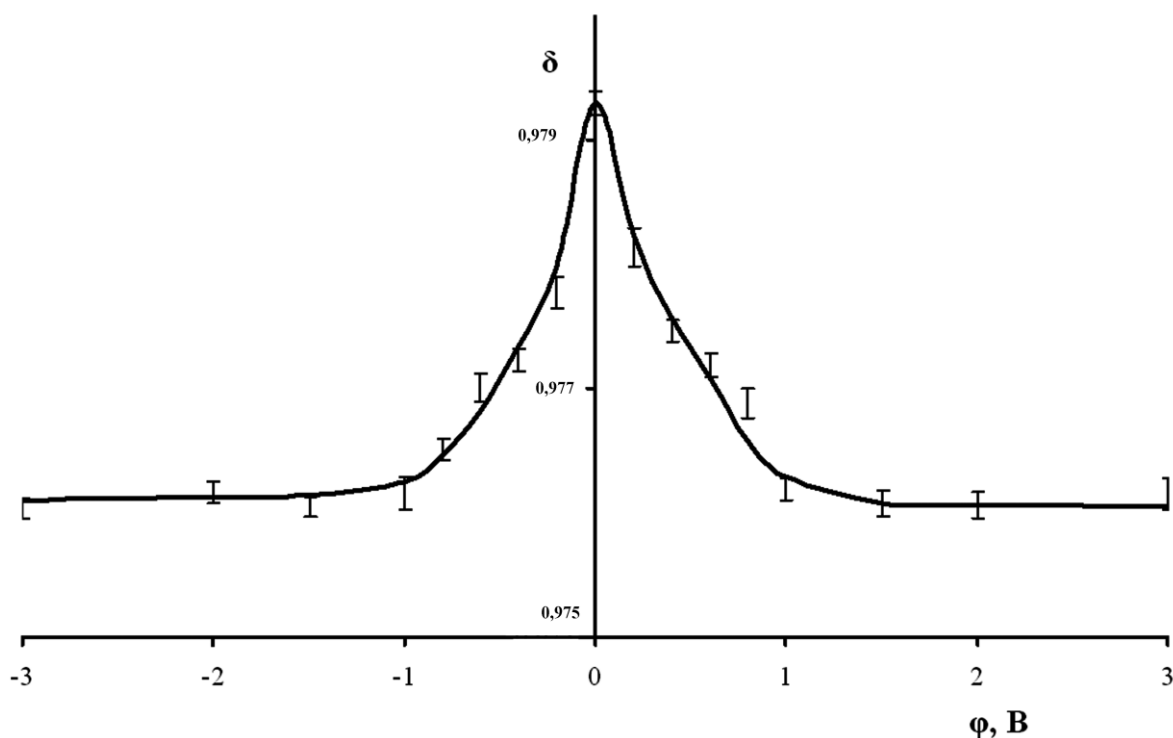


Рис. 2. Зависимость параметра пластичности меди от электрического потенциала

Установлено, что релаксация параметра пластичности при отключении от электрического потенциала происходит не до первоначального значения (см. рис. 2, 3, в). По-видимому, как в [12], приложение электрического потенциала приводит к увлечению и перераспределению дислокаций, а также к их размножению и, как следствие, к восстановлению пластичности материала не до первоначального значения. Для проверки этого предположения требуются дополнительные прецизионные исследования, например, методами просвечивающей электронной микроскопии.

При отключении от образца электрического потенциала и контактирующего с ним металла параметр пластичности релаксирует во времени согласно уравнению

$$\delta \sim \exp -t/\tau ,$$

где постоянная времени τ , как видно из рис. 3, зависит от величины подключенного потенциала. Для значений потенциала $\phi = 0,6$ В она ≈ 460 с (см. рис. 3). Поскольку емкость поверхностного слоя металла $C_c = \epsilon_0 \epsilon S/d \geq 10^{-5}$ Ф при $S \approx 10^{-4}$ м² и $d \approx 10^{-10}$ м, то при любых разумных значениях его сопротивления R $\tau \gg RC_c$. Это

показывает, что вариации пластичности металлов в указанных условиях связаны с более долгоживущими изменениями состояния поверхностного слоя, определяемыми, например, химическими взаимодействиями и инициированными событиями в двойном электрическом слое на поверхности [13; 14].

Результаты наибольшего эффекта изменения параметра пластичности по второму способу воздействия на медный образец представлены в таблице ниже. Эти данные показывают, что относительное изменение параметра пластичности для разных пар металлов составляет $-0,2129 \leq Q \leq -0,0844$. Статистическая оценка полученных величин по \hat{t} -критерию Стьюдента показывает, что при числе степеней свободы

$$n = n_E + n_0 - 2 = 30 + 30 - 2 = 58$$

с более чем 95 % уровнем вероятности должна быть принята гипотеза о том, что взаимно соответствующие значения $\bar{\delta}_0$ и $\bar{\delta}_E$ в каждой паре принадлежат к выборкам из различных генеральных совокупностей, т. е. различаются значимо.

В свете полученных результатов могут представлять интерес данные о возможном влиянии величины массы присоединенного

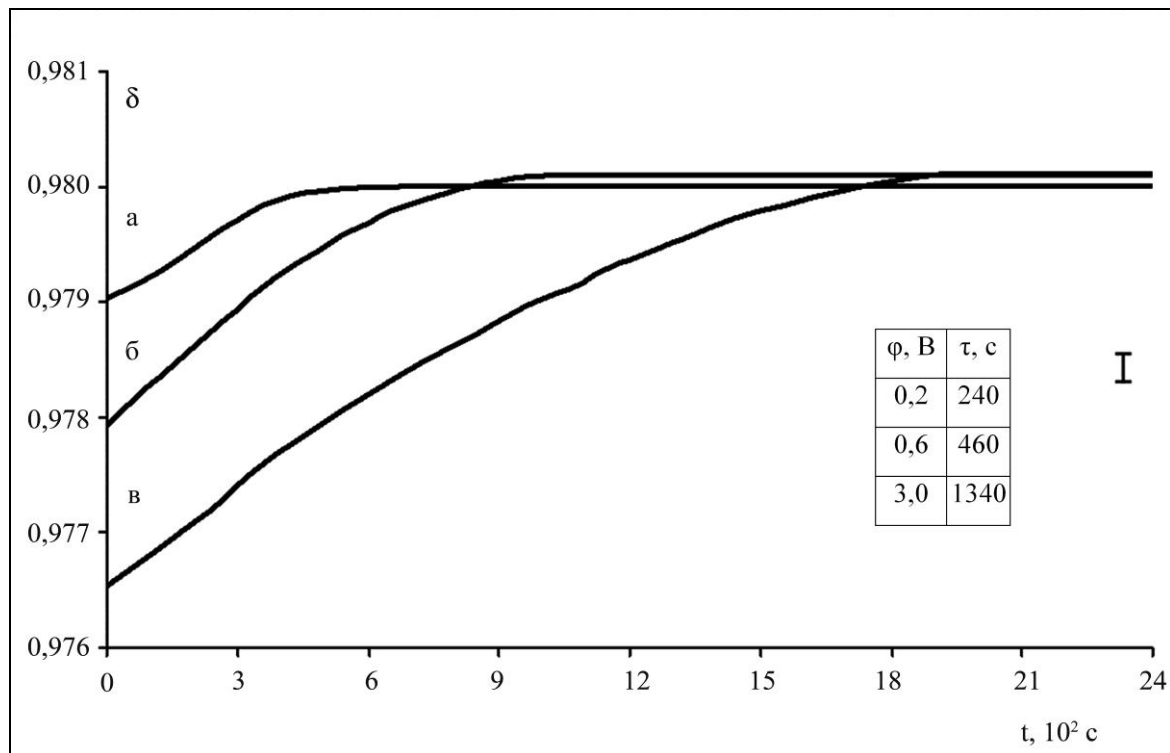


Рис. 3. Зависимость параметра пластичности меди от времени после отключения потенциала:
a – φ = 0,2 В; *б* – φ = 0,6 В; *в* – φ = 3 В

Изменение параметра пластичности Cu при возникновении контактной разности потенциалов

Воздействующий металл	Δφ, В	$\bar{\delta}_0$	$\bar{\delta}_E$	Q, %
Ni	0,10	0,9797	0,9789	-0,0880
Al	-0,15		0,9787	-0,1047
Cr	0,18		0,9779	-0,1872
Ti	-0,45		0,9777	-0,2129
Fe	-0,09		0,9789	-0,0844
Pb	-0,40		0,9776	-0,2160

Примечание: Δφ – контактная разность потенциалов, определяемая по формуле $\Delta\phi = \frac{A_{Me} - A}{e}$, где A_{Me} – работа выхода электрона из соответствующего металла, A – то же для Cu, e – заряд электрона; $Q = \frac{\bar{\delta}_E - \bar{\delta}_0}{\bar{\delta}_0} \cdot 100\%$, где $\bar{\delta}_E$ и $\bar{\delta}_0$ – средние значения параметра пластичности образца при контакте действующего металла и без действия соответственно.

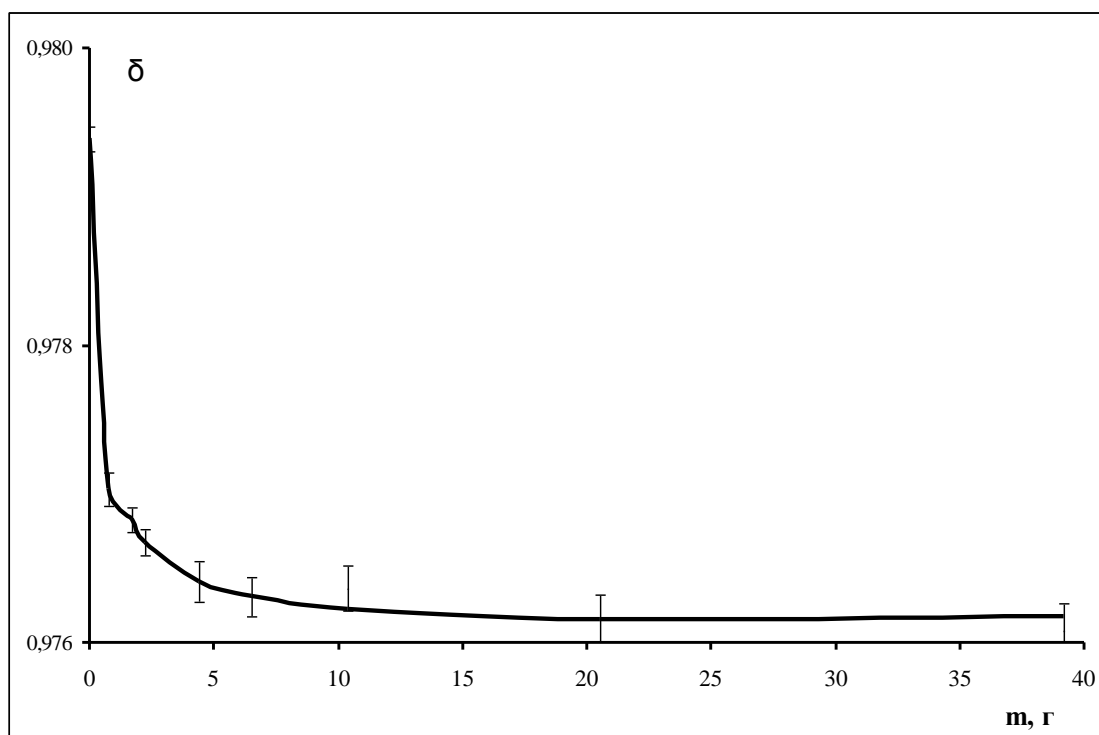


Рис. 4. Зависимость параметра пластичности меди от массы присоединенного Zr

металла на пластичность. Впервые на эффект присоединенной массы на ползучесть Cu обращено внимание авторами [4].

Оказалось, что зависимость микротвердости (и соответственно параметра пластичности) от этой величины действительно существует, причем, как следует из рис. 4, зависимость параметра пластичности от массы контактирующего металла (Zr) имеет экспоненциальный характер.

Отметим, что полученные в работе эффекты установлены впервые. Одно из возможных объяснений результатов может заключаться в том, что электрический контакт разнородных металлов, создающий контактную разность потенциалов, вызывает перезарядку имеющихся на поверхности двойных электрических слоев [11]. Это, в свою очередь, приводит к изменению плотности поверхностной энергии исследуемого материала [2; 14], что, естественно, вызывает соответствующее изменение механических свойств, в частности параметра пластичности, микротвердости и скорости ползучести [6]. Причем, как показано в [6], существует качественная эквивалентность электрического воздействия на исследуе-

мый металл и воздействия металлов с отличной работой выхода.

Установленные в настоящей работе эффекты непосредственно указывают на существование связи между электронной структурой и механическими свойствами металлов и обращают внимание на возможность ее наблюдения с помощью простых экспериментальных методов. Ранее одно из проявлений такой связи наблюдалось при измерении характеристик макролокализации пластического течения, вызванной изменением числа электронов, приходящихся на элементарную ячейку металла [15]. В то же время ясно, что природа таких эффектов весьма сложна [16–18] и нуждается в тщательном изучении. Очевидно, что их учет необходим, например, при объяснении движения дислокаций в металлах при действии электрического поля [12; 19] и других тонких эффектов.

Список литературы

1. Кайбышев О. А. Пластичность и сверхпластичность металлов. М.: Металлургия, 1975. 280 с.

2. Лихтман В. И., Шукин Е. Д., Ребиндер П. А. Физико-химическая механика металлов. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 303 с.
3. Клытин А. А. О ползучести металлов при воздействии электрического тока // Проблемы прочности. 1973. № 9. С. 35–37.
4. Клытин А. А., Лучина А. А. Влияние контакта разнородных металлов на ползучесть меди и алюминия // Изв. АН СССР. Металлы. 1985. № 2. С. 138–146.
5. Клытин А. А., Соловьев Е. С. Связь электронной эмиссии с ползучестью металлических материалов // Проблемы прочности. 1976. № 11. С. 45–49.
6. Коновалов С. В., Данилов В. И., Зуев Л. Б. и др. О влиянии электрического потенциала на скорость ползучести алюминия // Физика твердого тела. 2007. Т. 49, вып. 8. С. 1389–1391.
7. Алехин В. П. Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов. М.: Наука, 1983. 280 с.
8. Мильман Ю. В., Дуб С. Н., Голубенко А. А. Масштабная зависимость твердости и характеристики пластичности, определяемой при индентировании // Деформация и разрушение материалов. 2008. № 8. С. 3–10.
9. Харитонов Л. Г. Определение микротвердости. М.: Металлургия, 1967. 47с.
10. Митропольский А. К. Техника статистических вычислений. М.: ГИФМЛ, 1961. 479 с.
11. Ашкрофт Н., Мермин Н. Физика твердого тела. М.: Мир, 1979. Кн. 1. 399 с.
12. Бойко Ю. И., Гегузин Я. Е., Клиничук Ю. И. Экспериментальное обнаружение увлечения дислокаций электронным ветром в металлах // Письма в ЖЭТФ. 1979. Т. 30. С. 168–172.
13. Спицин В. И., Троицкий О. А. Электропластическая деформация металлов. М.: Наука, 1985. 187 с.
14. Гохитейн А. Я. Поверхностное натяжение твердых тел и адсорбция. М.: Наука, 1976. 400 с.
15. Zuev L. B. The Linear Work Hardening Stage and de Broglie Equation for Autowaves of Localized Plasticity // Int. J. Solids Structures. 2005. Vol. 42. P. 943–949.
16. Фикс В. Б. Ионная проводимость в металлах и полупроводниках. М.: Наука, 1969. 295 с.
17. Molotskii M., Flerov V. Spin Effects in Plasticity // Phys. Rev. Lett. 1997. Vol. 78. No. 14. P. 2779–2782.
18. Molotskii M. Theoretical Basis for Electro- and Magnetoplasticity // Mater. Sci. Engng. 2000. Vol. 287. Is. 2. P. 248–258.
19. Зуев Л. Б., Громов В. Е., Курилов В. Ф. Подвижность дислокаций в монокристаллах цинка при действии импульсов тока // Докл. АН СССР. 1978. Т. 239, № 1. С. 84–86.

Материал поступил в редколлегию 16.03.2009

S. V. Konovalov, N. V. Kotova, O. A. Stolboushkina, V. E. Gromov

METAL PLASTICITY OPERATION BY THE LOW ELECTRIC INFLUENCES

The influence of the electrical potential on the plasticity of Cu is studied experimentally. The dependence of the copper plasticity parameter on the electric potential ϕ for the range of values of $-3 \text{ V} < \phi < 3 \text{ V}$ is established. For the values ϕ equal to 0.2, 0.6 and 3 V the plasticity parameter relaxation times τ are established when the sample was switched of from the electric potential, created by electric field source. It is discovered, that the Cu plasticity parameter depends on connected Zr mass and this dependence has an exponential character.

Keywords: plasticity, electrical potential, copper.