

Краткие сообщения

05;12

Влияние электрического потенциала поверхности алюминия на процесс релаксации напряжений

© С.А. Невский, С.В. Коновалов, В.Е. Громов

Сибирский государственный индустриальный университет,
654007 Новокузнецк, Россия
e-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

(Поступило в Редакцию 25 августа 2010 г.)

Изучено влияние электрического потенциала поверхности технически чистого алюминия А85 на процесс релаксации напряжений. Установлено, что при изменении электрического потенциала образца от стабилизированного источника питания средняя скорость релаксации возрастает, а активационный объем уменьшается по мере увеличения абсолютного значения электрического потенциала. В случае подключения металлов с иной, чем у алюминия, работой выхода зависимости средней скорости релаксации и активационного объема от возникающей контактной разности потенциалов имеют немонотонный характер. Обсуждаются полученные результаты.

Введение

В процессе эксплуатации детали ответственного назначения находятся под воздействием переменных и постоянных электрических полей. Поэтому при расчетах деталей на прочность необходимо учитывать влияние этих воздействий. Результаты исследования воздействия переменных электрических полей (импульсного электрического тока) на пластическую деформацию металлов показали, что импульсный электрический ток существенно изменяет параметры релаксации напряжений, причем данные изменения связаны не только с нагревом образца, а включают в себя ряд эффектов: электронно-пластический, пинч-эффект и другие [11]. Работы [2,3] показывают, что кроме вышеперечисленных эффектов определенную роль играет нестационарное напряженно-деформированное состояние.

При изменении слабого электрического потенциала поверхности металла изменяются скорость ползучести и микротвердость, снижается вязкость разрушения образца и варьирует характер дислокационной субструктуры [4–8]. Исследование влияния слабых энергетических воздействий на процесс релаксации напряжений не проводилось, несмотря на то что релаксация напряжений является одним из распространенных в технике видов пластической деформации.

Целью настоящей работы является изучение влияния электрического потенциала поверхности алюминиевого образца на релаксацию напряжений в условиях сжатия.

В качестве материала для экспериментов был выбран поликристаллический алюминий технической чистоты марки А85. Перед проведением испытаний образцы подвергались отжигу при температуре 773 К в течение 2 h для снятия внутренних напряжений.

Как и в работах [4–8], изменение электрического потенциала осуществлялось двумя способами:

- 1) от стабилизированного источника питания;
- 2) подключение металлов с иной, чем у алюминия, работой выхода.

В настоящей работе применялись оба способа. Во избежание протекания тока образец изолировался от элементов установки. Испытания проводились при комнатной температуре. Анализировалось изменение средней скорости релаксации v и активационного объема γ , которые определялись по методикам [9,10]. Эффект влияния электрического потенциала поверхности образца характеризовался величинами относительных изменений этих параметров: $\delta = (v_{el}/v_0) - 1$; $\xi = (\gamma_{el}/\gamma_0) - 1$, где v_{el} и γ_{el} — значения средней скорости релаксации и активационного объема при электрическом воздействии, а v_0 и γ_0 — без воздействия.

Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 1, а приведена зависимость относительного изменения средней скорости релаксации от величины электрического потенциала. Видно, что при наложении потенциалов до ± 1.5 В значения δ увеличиваются, причем знак потенциала не играет никакой роли. Рис. 1, б демонстрирует изменение δ при подключении к образцу металлов с иной работой выхода. Зависимость δ от возникающей контактной разности потенциалов $\Delta\phi$ носит немонотонный характер. В области положительной контактной разности потенциалов резкое возрастание δ наблюдается при подключении меди, а затем при подключении Ni и Cr эффект меняет знак, присоединение железа, по-видимому, не вызывает изменения средней

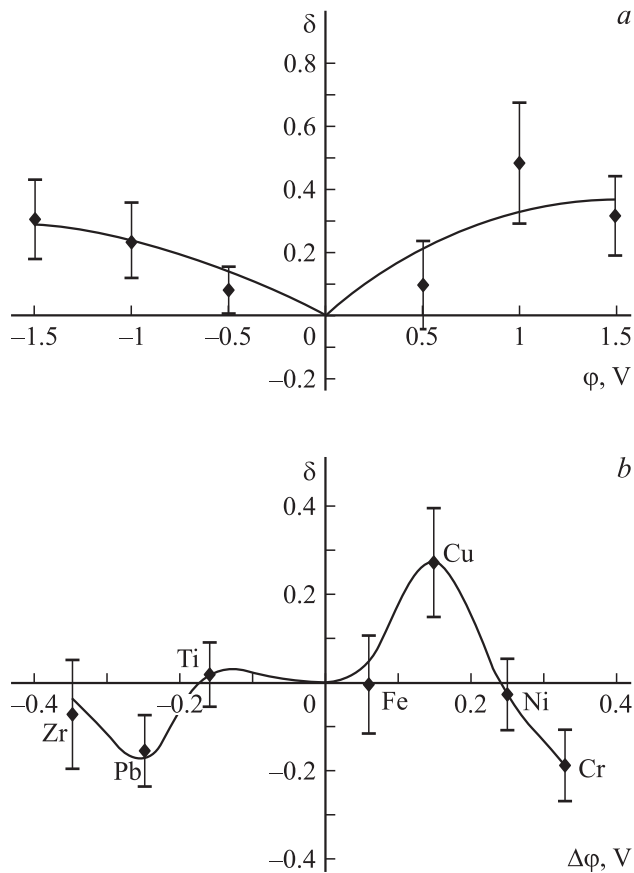


Рис. 1. Зависимости относительного изменения средней скорости релаксации от величины электрического потенциала (а) и контактной разности потенциалов (b).

скорости релаксации. Аналогичные эффекты были обнаружены в работах [4,5] при исследовании ползучести.

Установленные изменения средней скорости релаксации связаны с изменением активационных параметров процесса релаксации напряжений. Активационный объем при первом способе изменения потенциала поверхности снижается вне зависимости от его знака (рис. 2, а). При втором способе подключения наблюдается немонотонный характер зависимости относительного изменения активационного объема ξ от $\Delta\varphi$. Активационный объем понижается в случае подключения меди и титана, а затем эффект меняет знак. При подключении свинца $\xi_{Pb} = -0.02$, т.е. несколько меньше, чем при подключении титана ($\xi_{Ti} = -0.01$), но, по-видимому, активационный объем должен увеличиваться, так как процесс релаксации в данном случае замедляется (рис. 1, b).

Снижение активационного объема и повышение средней скорости релаксации напряжений при первом способе изменения электрического потенциала поверхности алюминия могут быть объяснены тем, что при наложении электрического потенциала поверхности снижается его микротвердость [5,6]. Изменение микротвердости алюминия авторы объясняют тем, что проявляется явление, аналогичное обнаруженному в работе

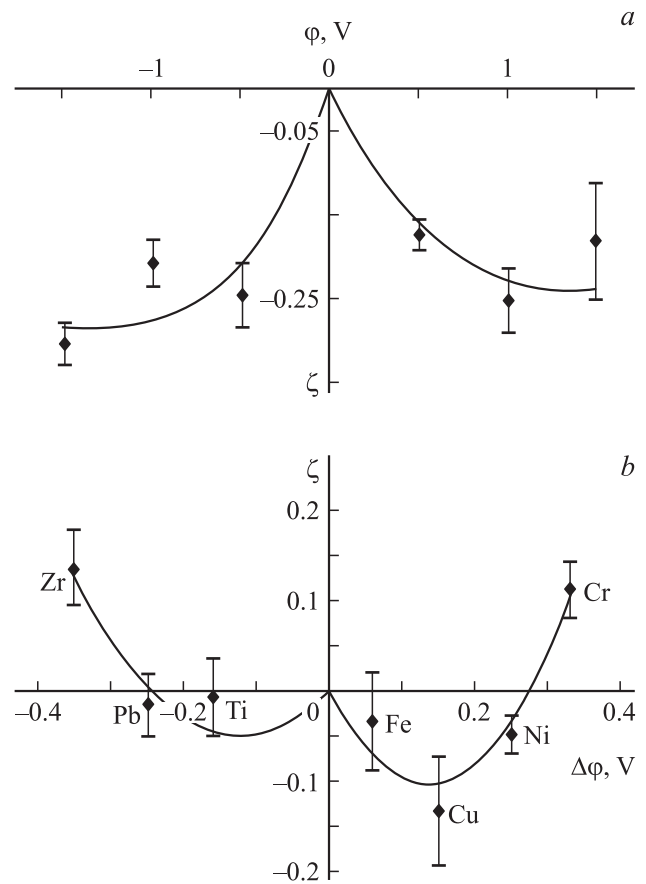


Рис. 2. Зависимость относительного изменения активационного объема ξ от электрического потенциала (а) и контактной разности потенциалов (b).

П.А. Ребиндера [9], которое заключается в изменении твердости металла при помещении его в поверхностно-активную среду. Оно обусловлено изменением поверхностной энергии и образованием двойного электрического слоя [11,12]. Эти изменения влияют на образование и размножение дислокаций в поверхностных слоях материала. Такая гипотеза была положена авторами работ [4,7,8] в основу объяснения изменений скорости ползучести при изменении электрического потенциала поверхности металла. Найденная в [13] корреляция между параметрами релаксации напряжений и твердостью металла дает основания полагать, что увеличение скорости релаксации и изменение микротвердости при варьировании электрического потенциала обусловлены одними и теми же причинами. В [14] предложена формула для вычисления удельной поверхностной энергии исходя из модели двойного электрического слоя как плоского конденсатора. При электрическом контакте металлов двойной электрический слой, согласно данной модели, рассматривается как слоистый конденсатор с емкостью, определяемой по закону сложения емкостей последовательно соединенных конденсаторов с расстояниями между обкладками d_1 и d_2 . Параметры d_1 и d_2 играют роль эффективной глубины проникновения элект-

Значения удельной поверхностной энергии металлов контактирующих с алюминием

Подключаемый металл	$\Delta\varphi$, V	Удельная поверхностная энергия $ W_e $, J/m ²
Цирконий	-0.35	0.010
Свинец	-0.25	0.20
Титан	-0.16	0.31
Железо	0.06	0.016
Медь	0.15	0.30
Никель	0.25	0.36
Хром	0.33	0.40

тростатического поля в металл 1 и 2 соответственно. Формула для удельной поверхностной энергии имеет вид

$$W_e = -\frac{1}{2} \frac{\varepsilon_0(\Delta\varphi)^2}{\left(\frac{d_1}{\varepsilon_1} + \frac{d_2}{\varepsilon_2}\right)}, \quad (1)$$

где ε_1 и ε_2 — диэлектрические константы металлов, ε_0 — электрическая постоянная, $\Delta\varphi$ — контактная разность потенциалов. Знак „минус“ говорит о том, что при контакте металлов происходит выделение энергии в межфазной области. Эффективная глубина проникновения электрического поля в металл вычисляется по формуле [14]:

$$d = \frac{h}{e} \sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0}{2m^*g} \left(\frac{g}{6\pi^2n}\right)^{1/3}}, \quad (2)$$

где h — постоянная Планка, e — заряд электрона, m^* — эффективная масса электронов в металле, g — кратность вырождения уровня Ферми, $n \cong (\rho/M)N_A$ — электронная плотность, где ρ — плотность вещества, M — молярная масса, N_A — постоянная Авогадро. Диэлектрическая константа металлов вычисляется по формуле

$$\varepsilon = 1 - \frac{\lambda m^*}{pe^2\varepsilon_0}, \quad (3)$$

где λ — удельная проводимость металла. Значения удельной поверхностной энергии при контакте алюминия с металлами приведены в таблице. Данные для d и ε подключаемых металлов, кроме циркония, взяты из [14]. Для циркония значения d и ε вычислены по формулам (3) и (2), при вычислении d полагалось, что $g = 2$, а эффективная масса вычислялась в приближении Хартри–Фока [15].

Представленная в таблице зависимость поверхностной энергии от контактной разности потенциалов имеет выраженный немонотонный характер, но корреляция между W_e и активационным объемом, и скоростью релаксации отсутствует. К аналогичному результату пришли авторы [14] при попытке установить связь между скоростью ползучести и W_e . По их мнению, одной из причин этого является наличие оксидной пленки, которая оказывает влияние на работу выхода [14], другой

причиной является наличие примесей. Расчет d и ε в [14] проводился для чистых металлов.

Изменение удельной поверхностной энергии как при втором способе изменения электрического потенциала поверхности, так и при первом, по-видимому, оказывает влияние на размножение и движение дислокаций в поверхностных слоях материала, нельзя исключать и образования дефектов препятствующих движению дислокаций [16]. В работе [8] установлено, что подключение пластин циркония разной массы существенно изменяет упругий модуль образца. Величина упругого модуля определяет энергию взаимодействия дислокаций и энергию дефекта упаковки [17].

Выводы

1. Проведено исследование влияния изменения электрического потенциала поверхности на процесс релаксации напряжений. Получены зависимости относительных изменений средней скорости релаксации и активационного объема от величины электрического потенциала и контактной разности потенциалов.

2. Проведен анализ установленных зависимостей с позиций представлений об изменении поверхностной энергии при изменении электрического потенциала.

Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 гг.“ (гос. контракт №П411).

Список литературы

- [1] Громов В.Е., Зуев Л.Б., Козлов Э.В. и др. Электростимулированная пластичность металлов и сплавов. М.: Недра, 1996. 290 с.
- [2] Степанов Г.В., Бабуцкий А.И., Мамеев И.А. // Проблемы прочности. 2004. № 4. С. 60.
- [3] Степанов Г.В., Бабуцкий А.И., Мамеев И.А. // Проблемы прочности. 2009. № 6. С. 44.
- [4] Коновалов С.В., Данилов В.И., Зуев Л.Б. и др. // ФТТ. 2007. Т. 49. Вып. 8. С. 1389.
- [5] Зуев Л.Б., Данилов В.И., Коновалов С.В. и др. // ФТТ. 2009. Т. 51. Вып. 6. С. 1077.
- [6] Коновалов С.В., Котова Н.В., Столбоушкина О.А. и др. // Вестн. НГУ. Сер. Физика. 2009. Т. 4. Вып. 4. С. 65.
- [7] Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Stolboushchina O.A. et al. // Mater. Sci. and Eng. A. 2010. Vol. 527. P. 858.
- [8] Коновалов С.В., Филиппов Р.А., Столбоушкина О.А. и др. Прочность и пластичность металлов при слабых энергетических воздействиях. Новокузнецк: Новокузнецкий полиграфический комбинат, 2009. 180 с.
- [9] Брздыка А.М., Гецов Л.Б. Релаксация напряжений в металлах и сплавах. М.: Металлургия, 1978. 256 с.
- [10] Ивэнс А., Роулингс Р. Термически активированные процессы в кристаллах / Под ред. А.Н. Орлова. М.: Мир, 1973. 172 с.
- [11] Лихтман В.И., Щукин Е.Д., Ребиндер П.А. Физико-химическая механика металлов. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 303 с.

- [12] *Гохштейн А.Я.* Поверхностное натяжение твердых тел и адсорбция. М.: Наука, 1976. 400 с.
- [13] *Ровинский Б.М., Воротников Г.С.* Механизмы релаксационных явлений в твердых телах / Под ред. В.С. Постникова и Л.К. Гордиенко. М.: Наука, 1972. С. 5.
- [14] *Клытин А.А., Лучина А.А.* // Изв. АН СССР. Сер. Металлы. 1985. № 2. С. 138.
- [15] *Ашкрофт Н., Мермин Н.* Физика твердого тела. М.: Мир, 1979. Т. 1. 400 с.
- [16] *Баранов Ю.В.* Эффект А.Ф. Иоффе на металлах. М.: МГИУ, 2005. 140 с.
- [17] *Хоникомб Р.* Пластическая деформация металлов. М.: Мир, 1972. 408 с.