

## О влиянии электрического потенциала на скорость ползучести алюминия

© С.В. Коновалов, В.И. Данилов\*, Л.Б. Зуев\*, Р.А. Филиппев, В.Е. Громов

Сибирский государственный индустриальный университет,  
654007 Новокузнецк, Россия

\* Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук,  
634021 Томск, Россия

E-mail: ibz@ispms.tsc.ru

(Поступила в Редакцию 24 октября 2006 г.)

Экспериментально исследовано влияние электрического потенциала на скорость ползучести алюминия. Произведено сравнение влияния собственно электрического потенциала, подаваемого на образец, и потенциала, возникающего из-за контактной разности потенциалов при присоединении семи различных металлов с иной работой выхода электрона. Обнаружена качественная эквивалентность этих двух типов электрического воздействия.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 05-08-18248а).

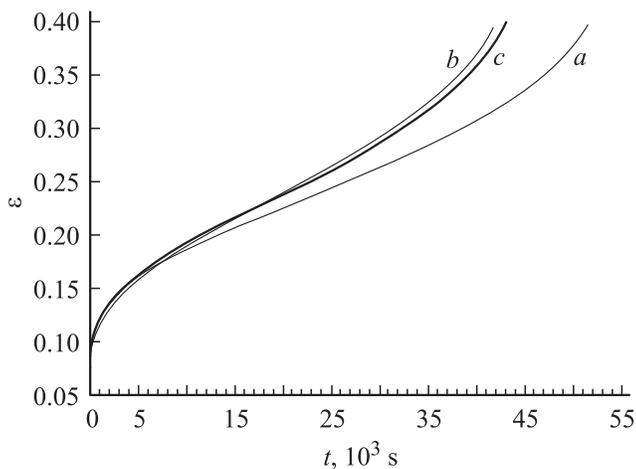
PACS: 62.20.Hg, 68.35.Gy, 73.20.-r

Известно, что воздействие электрических полей на нагружаемый объект может заметно изменять его деформационные характеристики [1]. Наиболее изучено в этом плане влияние обработки короткими высокоамплитудными импульсами электрического тока, которая, оказывая влияние на деформационную субструктуру, может изменять распределение внутренних напряжений, фазовый состав, зеренную структуру и в конечном счете существенно снижать сопротивление деформированию [2,3]. Природа токового воздействия сложна и включает в себя ряд взаимосвязанных эффектов: электронно-пластический, пондеромоторный, или пинч-эффект, скин-эффект, выделение джоулева тепла. Задача выделения этих эффектов в чистом виде и выяснения удельного вклада каждого из них в пластификацию материала не тривиальна и далека от своего разрешения.

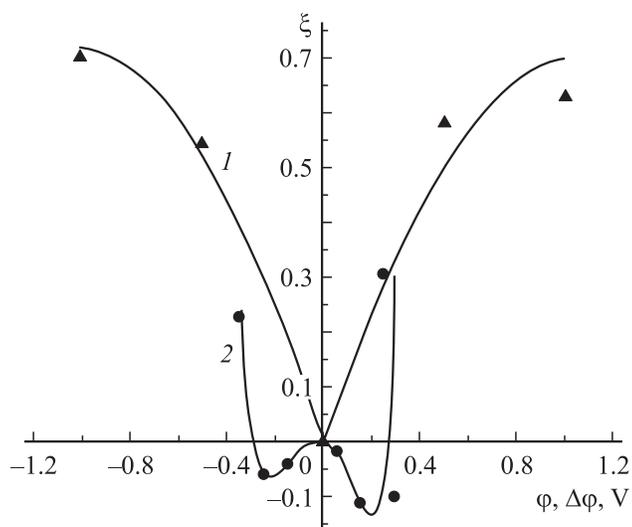
Такая задача, успешно решаемая при анализе электропластического [4] эффекта в непроводящих материалах с ионной или ковалентной связью, значительно усложняется в металлах, в которых электроны проводимости экранируют любое электростатическое воздействие. Однако именно по этой причине в металлических системах легко изменить состояние поверхности, меняя ее электрический потенциал, величина которого контролирует ход многих практически важных процессов, таких как различные виды коррозии, износ и выносимость в агрессивных средах и т.п. Влияние электрического потенциала на пластическое течение металлических систем изучено в значительно меньшей степени. Так, например, в работах [5–7] было обращено внимание на интереснейший факт изменения скорости ползучести металлов, деформируемых в электрическом контакте с другим металлом. К сожалению, физическая природа явления и его феноменология остались до конца невыясненными.

В настоящей работе предпринята попытка исследовать влияние электрического потенциала на скорость низкотемпературной ползучести технически чистого алюминия. Исследования выполнены на отожженных при 770 К в течение 2 h рекристаллизованных проволочных образцах диаметром 2.5 mm и с длиной рабочей части 200 mm. Для записи деформации ползучести была сконструирована установка с программным модулем, позволяющим фиксировать во времени удлинение испытываемого образца, вызванное действием постоянного растягивающего напряжения 36.7 МПа ( $\sim 10^{-4}\epsilon$ ) при комнатной температуре. В процессе деформации с момента приложения нагрузки непрерывно фиксировалась общая деформация удлинения образца как функция времени  $\epsilon(t)$ .

Были использованы два варианта изменения электрического состояния исследуемого образца. Первый из них состоял в том, что к изолированному образцу, подвергнутому испытанию на ползучесть, от внешнего стабилизированного источника постоянного напряжения подводился положительный или отрицательный потенциал разной величины. Во втором случае эффект достигался, как и в работах [5,6], электрическим подключением к изолированному образцу металлических пластин с массой  $\sim 5$  kg и Pb, Fe, Cu, Cr, Zr, Ni и Ti. Все эти металлы имеют отличную от алюминия работу выхода электронов. Далее в качестве их количественной характеристики будут использованы значения контактной разности потенциалов с алюминием, рассчитанные для них как  $\Delta\varphi = \frac{A_{Me} - A_{Al}}{e}$ , где  $A_{Me}$  — работа выхода электрона из соответствующего металла,  $A_{Al}$  — то же для Al,  $e$  — заряд электрона. Пластины подключались к образцу перед проведением испытаний на ползучесть, и электрический контакт осуществлялся медным проводом сечением 0.1 mm в течение всего эксперимента. С целью исключения электрического тока через образец



**Рис. 1.** Типичные кривые ползучести алюминия, полученные в обычных условиях (*a*), при потенциале поверхности 1 В (*b*) и при подключении Ni (*c*).



**Рис. 2.** Зависимости относительной скорости ползучести  $\xi$  от приложенного к образцу потенциала  $\varphi$  (1) и контактной разности потенциалов  $\Delta\varphi$  (2).

вся испытательная установка изолировалась от земли. В настоящей работе главное внимание уделено стадии установившейся ползучести, скорость деформации на которой  $\dot{\varepsilon} = \text{const}$  определялась численным дифференцированием зависимости  $\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + \dot{\varepsilon}t$ , описывающей кинетику процесса.

Типичные примеры зависимостей  $\varepsilon(t)$ , приведенные на рис. 1, показывают, что полученные кривые содержат стадии истоающей (логарифмической), установившейся и ускоренной ползучести, что совпадает с общепринятыми представлениями о кинетике процесса в таких условиях [8]. Кривая *a* описывает ползучесть алюминия при  $\varphi = 0$ ; кривая *b* получена при наложении потенциала  $\varphi = +1$  В. Наконец, кривая *c* отвечает случаю, когда во время испытания к алюминиевой

проволоке присоединялась пластина Ni. В случаях *b* и *c* отмечено ускорение ползучести. Кроме того, в этих случаях стадия установившейся ползучести укорачивается, а долговечность образца падает по сравнению с образцами, деформированными без электрического воздействия. Количественно электрический эффект характеризовался относительно изменениями скоростей ползучести на установившейся стадии процесса, определяемыми как  $\xi = \langle \dot{\varepsilon}_{el} \rangle / \langle \dot{\varepsilon} \rangle - 1$ , где  $\langle \dot{\varepsilon}_{el} \rangle$  — усредненное по 7–10 образцам значение скорости ползучести в случае внешнего электрического воздействия, а  $\langle \dot{\varepsilon} \rangle$  — среднее значение скорости ползучести образца без него.

Результаты проведенных экспериментов обобщены на рис. 2. Кривая 1 иллюстрирует зависимость относительного изменения скорости ползучести алюминия  $\xi$  от потенциала в интервале  $-1 < \varphi < +1$  В. Независимо от знака потенциала величина  $\xi$  растет, но по мере увеличения абсолютного значения потенциала скорость нарастания уменьшается.

Влияние присоединенных металлов показано с помощью кривой 2 на рис. 2. Наиболее заметное увеличение скорости ползучести наблюдается при  $\Delta\varphi \approx \pm 0.5$  В для Zr и Ni соответственно. При значениях контактной разности потенциалов  $+0.2 > \Delta\varphi > -0.25$  В эффект имеет другой знак, т.е. ползучесть в этом случае замедляется. В целом можно признать, что кривые 1 и 2 качественно подобны, но зависимость  $\xi(\Delta\varphi)$ , построенная по точкам, соответствующим разным металлам, имеет два минимума и, очевидно, более сложная.

Поскольку избыточный электрический заряд, передаваемый металлу при любой постановке эксперимента, сосредоточен на поверхности образца, то изменение скорости ползучести логично связать с изменением плотности поверхностной энергии, как это предполагалось авторами монографии [9]. В ней приведены экспериментальные данные об аналогичных изменениях скорости ползучести, которые были получены при деформации олова и свинца. Они указывают на рост скорости ползучести при наличии поляризующего потенциала на образце. Изменение скорости ползучести также не зависело от знака потенциала и определялось только его абсолютной величиной.

В пользу такого объяснения эффекта говорят данные о вариациях поверхностного натяжения твердых тел  $\theta$  при создании электрического потенциала поверхности (электрокапиллярный эффект) [10]. Важно отметить, что зависимости  $\theta(\varphi)$  имеют вид кривых с насыщением, т.е. по мере роста электрического потенциала его влияние ослабевает [10]. В свою очередь изменения  $\theta$  меняют условия зарождения дислокаций в поверхностных слоях и кинетику винтовых дислокаций. Вполне возможны и более сложные по своей природе эффекты электрического поля [11–13]. Однако пока остается непонятной природа различия во влиянии прямого изменения потенциала поверхности и контактной разности потенциалов. Чтобы понять это, необходимо провести прецизионные исследования влияния действия малых потенциалов непосредственно от электрического источника.

## Список литературы

- [1] H.Conrad, A.F. Sprecher. In: Dislocation in solids / Ed. F.R.N. Nabarro. Elsevier Sci. Publ., London (1989). P. 499.
- [2] В.И. Спицин, О.А. Троицкий. Электропластическая деформация металлов. Наука, М. (1985). 187 с.
- [3] В.Е. Громов, В.И. Данилов, В.Я. Целлермаер, О.В. Сизова, Л.Б. Зуев. ФММ **74**, 129 (1992).
- [4] Л.Б. Зуев. Физика электропластичности щелочно-галогидных кристаллов. Наука, Новосибирск (1990). 120 с.
- [5] С.Т. Кишкин, А.А. Клыпин. ДАН СССР **211**, 325 (1973).
- [6] С.Т. Кишкин, А.А. Клыпин. ДАН СССР **216**, 771 (1974).
- [7] А.А. Клыпин, А.А. Лучина. ДАН СССР **288**, 370 (1986).
- [8] А.Д. Кеннеди. Ползучесть и усталость в металлах. Металлургия, М. (1965). 312 с.
- [9] В.И. Лихтман, Е.Д. Шукин, П.А. Ребиндер. Физико-химическая механика металлов. Изд-во АН СССР, М. (1962). 303 с.
- [10] А.Я. Гохштейн. Поверхностное натяжение твердых тел и адсорбция. Наука, М. (1976). 400 с.
- [11] L.V. Zuev, V.E. Gromov, L.I. Gurevich. Phys. Stat. Sol. (a) **121**, 437 (1990).
- [12] M. Molotskii, V. Flerov. Phys. Rev. Lett. **78**, 2779 (1997).
- [13] И.Л. Батаронов, Т.А. Бабенко, А.М. Рощупкин. Изв. РАН. Сер. физ. **61**, 877 (1997).