

УДК 539.3

DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-6-2158-2160

ДЕФОРМАЦИЯ АМОРФНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА И ПОСТОЯННОГО ТОКА

© А.Д. Березнер¹⁾, В.В. Красильников²⁾, В.А. Федоров¹⁾

¹⁾ Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина
392000, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Интернациональная, 33
E-mail: feodorov@tsu.tmb.ru

²⁾ Белгородский государственный университет
308015, Российская Федерация, г. Белгород, ул. Победы, 85
E-mail: kras@bsu.edu.ru

Исследован процесс ползучести аморфных металлических сплавов ленточной конфигурации в условиях воздействия электрического тока и электростатического потенциала.

Ключевые слова: изотермическая ползучесть; электростатический потенциал; теория ползучести

ВВЕДЕНИЕ

В настоящий момент имеется ряд работ, посвященных исследованию ползучести металлов и сплавов в условиях воздействия импульсного электрического тока [1], электростатического потенциала [2] и других внешних воздействий. В работе [3] оценивается влияние величины электростатического потенциала на скорость изотермической ползучести сплавов алюминия и меди, а также приводится ряд корреляционных соответствий, свидетельствующих о возможном отклике структуры сплавов на действие внешнего поля. Наличие этих и других результатов [4] позволяет сформулировать цели данной работы:

- 1) исследование ползучести аморфных металлических сплавов в условиях воздействия электростатического потенциала и тока;
- 2) расчет модуля Юнга аморфных сплавов в рамках классической теории ползучести.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В экспериментах использовали образцы аморфных металлических сплавов на основе кобальта с размерами $50 \times 3,5 \times 0,02$ мм, а также образцы поликристаллической меди с размером $53 \times 3 \times 0,25$ мм, выполненные в форме двойной лопатки. Исследования проводили на установке, представленной в работе [5]. Аморфные образцы испытывали на ползучесть при фиксированной температуре, не превышающей кристаллизационную ($T = 603$ К). Величина напряжения составляла $\sigma = 1,4$ ГПа. Наличие дополнительного нагрева обусловлено необходимостью подбора оптимальной скорости деформации образцов при заданной величине напряжения σ . Деформация осуществлялась в двух режимах: ползучесть с одновременным подведением электрического потенциала, величиной 0,7 В, а также ползучесть с нулевым потенциалом. В отдельной серии экспери-

ментов на аморфные образцы подавался постоянный ток ($I = 1$ А). Для сравнения деформации аморфных и поликристаллических сплавов проводились аналогичные эксперименты на медных образцах, предварительно рекристаллизованных при температуре $T = 700$ К. Испытания на медном образце проводились при комнатных температурах, с приложенным напряжением $\sigma = 0,14$ ГПа. Для измерения модуля Юнга в условиях нагрева проводили испытания на разрывной машине Instron-5565 со встроенной камерой нагрева.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В работе установлено, что процесс ползучести аморфных сплавов случайным образом протекает в нескольких режимах: в линейном или в нелинейном – подобном изотермической деформации металлических сплавов (рис. 1). Наличие аналогичных режимов деформации, исследованных в работах [2–3], позволяет провести испытания на ползучесть аморфных сплавов в условиях воздействия электростатического потенциала и электрического тока.

В работе [3] отмечено увеличение скорости ползучести медных образцов при подведении к ним электростатического потенциала $\varphi = 0,7$ В. Данный эффект не зависит от знака подаваемого потенциала и проявляется на стадии установившейся ползучести. Аналогичные эксперименты, проведенные нами на аморфных сплавах, показывают наличие перекрытия интервалов погрешности для образцов, деформированных с воздействием потенциала и без него. Это затрудняет интерпретацию результатов ползучести в пользу увеличения или замедления скорости деформации.

Для сравнения деформационной динамики аморфных и поликристаллических металлов проводили испытания на ползучесть медных образцов в условиях воздействия электростатического потенциала.

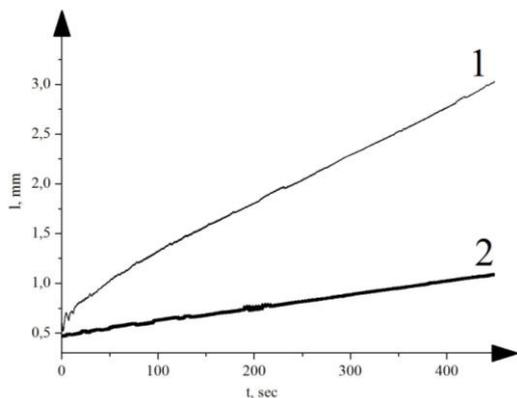


Рис. 1. Кривые ползучести аморфного сплава: 1) нелинейный режим (аналогичен деформации классического металла); 2) линейный режим

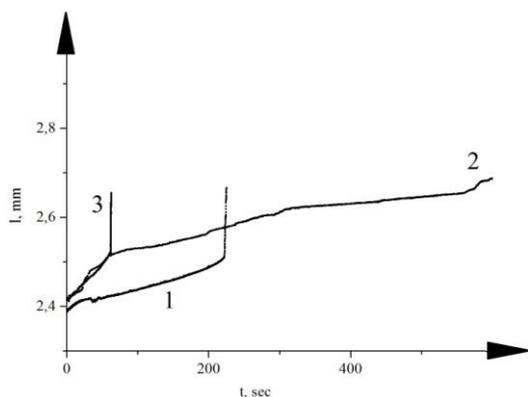


Рис. 2. Кривые ползучести медного образца в условиях: 1) без потенциала; 2) и 3) с приложенным потенциалом 0,7 В

На рис. 2 представлены кривые ползучести медного поликристаллического сплава.

Как видно из рис. 2, экспериментальные данные могут численно различаться в зависимости от некоторых условий эксперимента. При этом не удается однозначно доказать наличие влияния электростатического потенциала на скорость установившейся ползучести образцов ввиду возможного статистического разброса данных, обусловленного иными причинами (первичная обработка образцов, наличие дефектов и др.).

Таким образом, для исследования влияния электростатического потенциала $\varphi = 0,7$ В на ползучесть поликристаллических медных образцов необходимы дополнительные исследования.

Подведение постоянного тока к аморфным образцам приводит лишь к их тепловому нагреву с одновре-

менным обратимым расширением, регистрируемым на кривых ползучести. В работе обнаружено наличие критической температуры, при достижении которой в процессе джоулевого нагрева увеличивается угол наклона кривой деформации аморфных образцов, с последующим восстановлением наклона при прекращении подачи тока. При понижении внешней температуры эксперимента изменения угла наклона деформационной кривой не происходит.

Исходя из вида деформационных кривых аморфных металлических сплавов, провели расчет модуля Юнга в рамках наследственной теории вязкоупругости [6]. Установлено, что в случае процесса изотермической ползучести применимо уравнение Вольтерра 2 рода:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E} + \frac{1}{E} \int_0^t K(t-\tau)\sigma(\tau)d\tau, \quad (1)$$

в котором $\varepsilon(t)$ – деформация образца; $\sigma(t)$ – величина напряжения; E – модуль упругости; $K(t-\tau)$ – функция влияния, связанная со скоростью деформации; τ – время, предшествующее моменту наблюдения.

Зависимость (1) позволяет получить численное значение модуля упругости $E = 0,75$ ГПа, согласующееся с данными эксперимента по релаксации [7]. Такой подход позволяет дополнить методику расчетов механических характеристик аморфных металлических сплавов по аналогии с поликристаллическими материалами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Спицын В.И., Троицкий О.А.* Электропластическая деформация металлов. М.: Наука, 1985. 159 с.
2. *Коновалов С.В., Данилов В.И., Зуев Л.Б., Филищев Р.А., Громов В.Е.* О влиянии электрического потенциала на скорость ползучести алюминия // Физика твердого тела. 2007. Т. 49. С. 1389-1391.
3. *Коновалов С.В., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф.* Влияние электромагнитных полей и токов на пластическую деформацию металлов и сплавов. Новокузнецк: Изд-во «Интер-Кузбасс», 2013. 292 с.
4. *Гохштейн А.Я.* Поверхностное натяжение твердых тел и адсорбция. М.: Наука, 1976. 400 с.
5. *Березнер А.Д., Федоров В.А., Плужникова Т.Н., Васильева С.В.* Экспериментальное и аналитическое исследование неоднородной деформации аморфных и нанокристаллических металлических сплавов при нагреве // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. Тамбов, 2016. Т. 21. Вып. 3. С. 734-740.
6. *Колтунов М.А.* Ползучесть и релаксация. М.: Высш. шк., 1976. 277 с.
7. *Яковлев А.В., Федоров В.А.* Проявление электропластического эффекта в металлических стеклах // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. Тольятти, 2013. Вып. 3. С. 99-102.

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа выполнена при финансовой поддержке фонда РФФИ, грант № 16-32-50112.

Поступила в редакцию 24 мая 2016 г.

Березнер Арсений Дмитриевич, Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, г. Тамбов, Российская Федерация, аспирант, кафедра теоретической и экспериментальной физики, e-mail: qwert1009@mail.ru

Красильников Владимир Владимирович, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Российская Федерация, доктор физико-математических наук, профессор, старший научный сотрудник, e-mail: kras@bsu.edu.ru

Федоров Виктор Александрович, Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, г. Тамбов, Российская Федерация, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры теоретической и экспериментальной физики, e-mail: feodorov@tsu.tmb.ru

DEFORMATION OF AMORPHOUS METAL ALLOYS IN THE CONDITIONS OF ELECTROSTATIC POTENTIAL AND DIRECT CURRENT INFLUENCE

© A.D. Berezner¹), V.V. Krasilnikov²), V.A. Fedorov¹)

¹) Tambov State University named after G.R. Derzhavin
33 Internatsionalnaya St., Tambov, Russian Federation, 392000
E-mail: feodorov@tsu.tmb.ru

²) Belgorod National Research University
85 Pobedy St., Belgorod, Russian Federation, 308015
E-mail: kras@bsu.edu.ru

The process of creeping of amorphous metal alloys of stripe structure in the conditions of current and electrostatic potential is studied.

Key words: isothermal creeping; electrostatic potential; creeping theory

REFERENCES

1. Spitsyn V.I., Troitskiy O.A. *Elektroplasticheskaya deformatsiya metallov* [Electroplastic deformation of alloys]. Moscow, Nauka Publ., 1985. 159 p. (In Russian).
2. Kononov S.V., Danilov V.I., Zuev L.B., Filip'ev R.A., Gromov V.E. O vliyani elektricheskogo potentsiala na skorost' polzuchesti alyuminiya [On the influence of the electrical potential on the creep rate of aluminum]. *Fizika tverdogo tela – Physics of the Solid State*, 2007, vol. 49, pp. 1389-1391. (In Russian).
3. Kononov S.V., Gromov V.E., Ivanov Yu.F. *Vliyaniye elektromagnitnykh poley i tokov na plasticheskuyu deformatsiyu metallov i splavov* [Influence of electromagnetic fields and currents on plastic deformation of metals and alloys]. Novokuznetsk, "Inter-Kuzbass" Publ., 2013. 292 p. (In Russian).
4. Gokhshteyn A.Ya. *Poverkhnostnoye natyazheniem tverdykh tel i adsorbtsiya* [Superficial tension of solid bodies and adsorption]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 400 p. (In Russian).
5. Berezner A.D., Fedorov V.A., Pluzhnikova T.N., Vasil'eva S.V. Eksperimental'noe i analiticheskoe issledovanie neodnorodnoy deformatsii amorfnykh i nanokristallicheskiy metallicheskiy splavov pri nagreve [Experimental and analytical studies of inhomogeneous deformation in amorphous and nanocrystalline metallic alloys at heating]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya Estestvennye i tekhnicheskie nauki – Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences*. Tambov, 2016, vol. 21, no. 3, pp. 734-740. (In Russian).
6. Koltunov M.A. *Polzuchest' i relaksatsiya* [Creeping and relaxation]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1976. 277 p. (In Russian).
7. Yakovlev A.V., Fedorov V.A. Proyavlenie elektroplasticheskogo efekta v metallicheskiy steklakh [Manifestation electroplastic effect in metallic glass]. *Vektor nauki Tol'yatinskogo gosudarstvennogo universiteta – Vector of sciences. Togliatti State Universit, Tolyatti*, 2013, no. 3, pp. 99-102. (In Russian).

GRATITUDE: The work is fulfilled under financial support of RFFR fund, grant no. 16-32-50112.

Received 24 May 2016

Berezner Arseniy Dmitrievich, Tambov State University named after G.R. Derzhavin, Tambov, Russian Federation, Post-graduate Student, Theoretical and Experimental Physics Department, e-mail: qwert1009@mail.ru

Krasilnikov Vladimir Vladimirovich, Belgorod National Research University, Belgorod, Russian Federation, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Senior Research Worker, e-mail: kras@bsu.edu.ru

Fedorov Viktor Aleksandrovich, Tambov State University named after G.R. Derzhavin, Tambov, Russian Federation, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Professor of Theoretical and Experimental Physics Department, e-mail: feodorov@tsu.tmb.ru

Информация для цитирования:

Березнер А.Д., Красильников В.В., Федоров В.А. Деформация аморфных металлических сплавов в условиях воздействия электростатического потенциала и постоянного тока // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. Тамбов, 2016. Т. 21. Вып. 6. С. 2158-2160. DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-6-2158-2160

Berezner A.D., Krasilnikov V.V., Fedorov V.A. Deformatsiya amorfnykh metallicheskiy splavov v usloviyakh vozdeystviya elektrostaticheskogo potentsiala i postoyannogo toka [Deformation of amorphous metal alloys in the conditions of electrostatic potential and direct current influence]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya Estestvennye i tekhnicheskie nauki – Tambov University Review. Series: Natural and Technical Sciences*, 2016, vol. 21, no. 6, pp. 2158-2160. DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-6-2158-2160 (In Russian).