

© О.А. СТОЛБОУШКИНА, Т. ГУОУИ,
Г. СОНГ, С.В. КОНОВАЛОВ, В.Е. ГРОМОВ

stoxan@gmail.com, tanggy@tsinghua.edu.cn, songguolin@gmail.com,
konovalov@physics.sibsiu.ru, gromov@physics.sibsiu.ru

УДК 53.097; 539.376

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА НА ФОРМИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ АЛЮМИНИЯ ПРИ ПОЛЗУЧЕСТИ*

АННОТАЦИЯ. В данной работе методом просвечивающей электронной микроскопии выполнен анализ поверхности разрушения технически чистого алюминия, деформированного при ползучести в условиях приложения электрических потенциалов 1 В, 5 В и без электрического воздействия. В ходе исследований был выявлен негативный фактор влияния электрического потенциала на процесс ползучести, приводящий к увеличению скорости ползучести на установившейся стадии и снижению долговечности материала.

Установлено, что подведение электрического потенциала к поверхности образцов технически чистого алюминия, подвергаемых испытаниям на ползучесть, отражается на изменении количественных параметров, характеризующих структуру разрушения. Показано, что приложение электрических потенциалов до 5 В сопровождается формированием широкого диапазона размеров ямок сдвига и, соответственно, снижением вязкости разрушения при испытаниях на ползучесть, а также уменьшением длительности испытаний, что может привести к ускоренному разрушению изделий, эксплуатирующихся в условиях влияния электрического потенциала.

SUMMARY. In the present study fracture surface analysis was performed under creep tests of pure aluminum with applied electric potential of 1V, 5V, as well as without electrical action. For this investigation a scanning electron microscopy method was used. In research a negative effect of the electric potential on creep performance resulting in a creep rate increase and material durability reduction has been discovered.

It has been found out that application of electric potential to the surface of the samples of pure aluminum under creep test leads to quantitative changes of the parameters the fracture structure is characterized by.

It is demonstrated that application of electric potential up to 5 V is accompanied by pits of fracture of wide range of sizes and consequently by fracture viscosity reduction upon creep testing, as well as test time reduction. All this can cause premature failure of the item in service when electric potential is applied.

* Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 гг.» (ГК № 16.740.11.0314).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА. Ползучесть, электрический потенциал, поверхность разрушения, ямки разрушения.

KEY WORDS. Creep, electric potential, fracture surface, pits of fracture.

Металлические детали, изготовленные из алюминиевых сплавов для элементов теплоэнергетического, химического и другого оборудования, находящиеся при эксплуатации под действием статических механических нагрузок, со временем пластически деформируются. Одной из основных задач современной физики прочности и пластичности является создание таких материалов, механические свойства которых обеспечивали бы наибольшую долговечность изделия при максимально длительной эксплуатации [1].

Ранее проводились исследования алюминия на ползучесть и релаксацию напряжений в условиях действия электрического потенциала до 1 В, и было установлено, что он способен влиять на данные процессы, изменять их скорость и долговечность материала [2-4]. Так, приложение потенциала до 1 В к алюминию способно увеличивать скорость ползучести почти в 2 раза по сравнению с ползучестью без приложения потенциала [4, 5]. В работах [5-7] выявлено, что приложение потенциала 1 В оказывает влияние на эволюцию (скорость накопления и аннигиляции, механизмы зарождения и схему перестройки) дефектной субструктуры объема и приповерхностного слоя технически чистого алюминия при ползучести по сравнению с ползучестью без воздействия потенциала.

Выявление дефектов и анализ поверхности разрушения при низкотемпературной ползучести алюминия с приложением потенциалов 1 В и 5 В являлось целью настоящей работы.

В качестве материала исследований был выбран алюминий технической чистоты марки А85. Полученные после прокатки плоские образцы с размерами 170x5x1,8 мм³ перед испытаниями на ползучесть подвергали рекристаллизационному отжигу при $T=773\text{K}$, $t=2\text{ч}$. Часть образцов деформировалась в процессе ползучести в обычных условиях (без электрического воздействия), к другой части подводился электрический потенциал 1 В и 5 В. Температура при всех испытаниях контролировалась и составляла 300 К.

Приложение электрического потенциала к образцам осуществлялось с помощью стабилизированного источника питания в течение всего испытания на ползучесть. Для исключения протекания электрического тока через образец в процессе испытаний была выполнена электрическая изоляция образцов от элементов испытательной установки.

Эксперименты выполнялись на испытательной установке, оснащенной программным модулем, который позволял фиксировать удлинение во времени испытываемых образцов при постоянной нагрузке (60 МПа), подробное описание которой приведено в [8]. Исследование поверхности разрушения проводили с помощью методов растровой электронной микроскопии на приборе FE-SEM Hitachi S 4-800 в лаборатории микроструктурного анализа Института перспективных материалов Университета Циньхуа (г. Шэнчжень).

Как и в работах [3, 5] установлен эффект ускорения ползучести при подведении электрического потенциала к образцам в процессе экспериментов. На рис. 1 представлена типичная экспериментальная кривая ползучести алюминия с приложением потенциала 1 В. Среднее значение скорости ползучести на установившейся ее стадии в образцах, деформированных без электрического

воздействия, составило 0,03 1/ч. С приложением потенциалов средняя скорость процесса возросла: при 1В ее значение составило — 0,19 1/ч, при 5В — 0,06 1/ч. Наибольший эффект воздействия потенциала на материал наблюдался именно при 1 В.

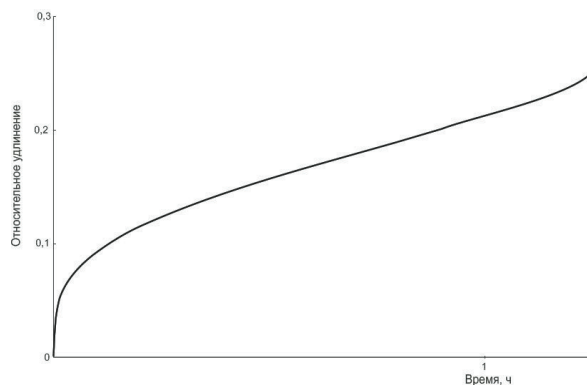


Рис. 1. Экспериментальная кривая ползучести алюминия (без воздействия потенциала)

Для выявления эффекта влияния электрического потенциала на характер разрушения проводился количественный анализ диаметров ямок изломов по 5-ти фрактограммам для каждого состояния материала, т.е. без электрического воздействия и с приложением потенциалов.

Характерные изображения поверхности разрушения представлены на рис. 2 и 3. Как правило, поверхность разрушения гладких цилиндрических образцов состоит из волокнистой зоны, радиальной и зоны среза [9]. В нашем случае поверхность излома плоского образца содержит волокнистую и зону среза. В центре излома располагается волокнистая зона, характеризующаяся большим числом ямок разрушения. Вблизи поверхности разрушения отмечается большое число полос скольжения. Микротрещин на боковой поверхности не обнаружено.

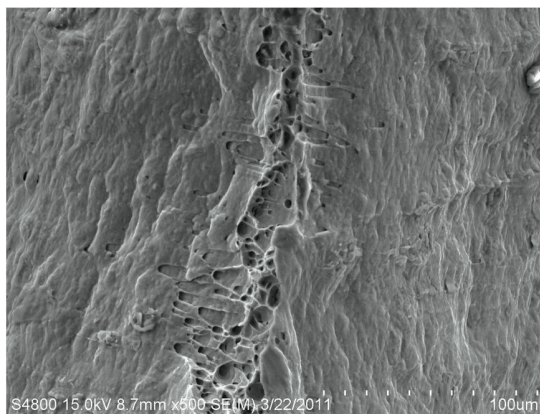


Рис. 2. Поверхность разрушения алюминия; ползучесть без приложения потенциала

В образцах, разрушенных в процессе ползучести при подведении потенциала, преимущественно формировались ямки сдвига (рис.3), вытянутые в одном и том же направлении (в направлении сдвига) и ямки вязкого излома.

Установлено, что диаметры ямок разрушения варьируются в пределах от 0,5 до 19,5 мкм.

В ходе количественного анализа поверхности разрушения было выявлено, что диаметры ямок разрушения варьируются в пределах от 0,5 до 19,5 мкм. Средний диаметр ямок в образцах, разрушенных без приложения потенциала (рис. 4а), составляет 4,76 мкм. В образцах, разрушенных с применением потенциалов 1В и 5В, средние размеры ямок составляют 2,09 мкм и 2,12 мкм, соответственно (рис. 4б, в). Таким образом, действие электрического потенциала снижает размеры диаметров ямок в 2,2 раза.

Форму и глубину ямок (микропор) можно связать (при условии испытания одного материала и идентичной схемы нагружения) с вязкостью разрушения. Глубокие конические ямки часто наблюдаются при разрушении очень пластичных материалов [9]. Считается [10], что повышение трещиностойкости сопровождается увеличением глубины ямок на поверхности изломов. Если предположить, что глубина ямок вязкого излома пропорциональна их размеру, то можно заключить, что приложение потенциала способствует некоторому снижению вязкости разрушения технически чистого алюминия в условиях ползучести.

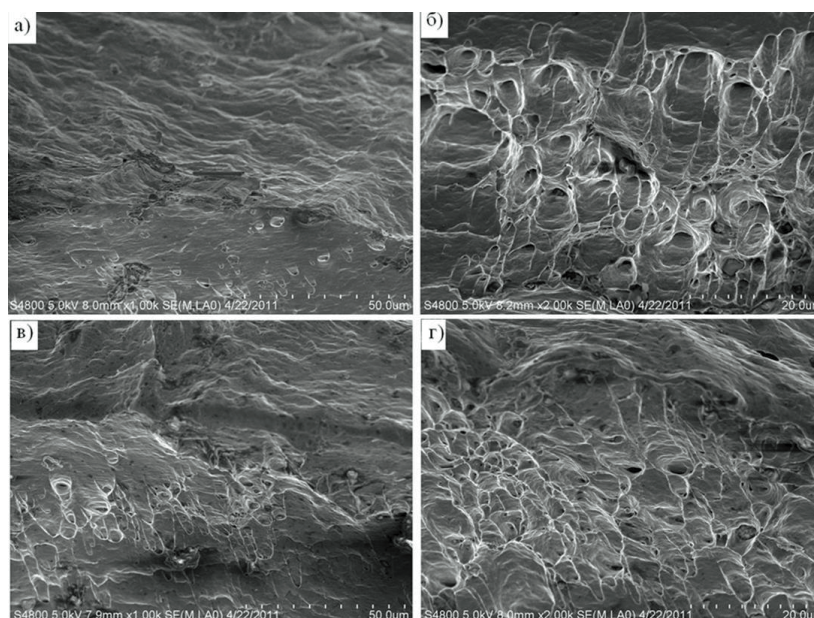


Рис. 3. Поверхность разрушения алюминия, сформированная при ползучести с приложением потенциалов 1 В (а, б) и 5 В (в, г)

Так как рост числа мест зарождения микропор приводит к уменьшению размера ямок, можно сделать заключение, что приложение электрического потенциала способствует увеличению мест зарождения ямок вязкого излома и приводит к снижению вязкости разрушения.

Проведенный анализ поверхности разрушения показал, что подведение электрического потенциала к поверхности технически чистого алюминия, подвергаемого испытаниям на ползучесть, находит отражение на изменении коли-

чественных параметров, характеризующих структуру разрушения. Установлено, что приложение электрических потенциалов до 5 В сопровождается формированием широкого диапазона размеров ямок сдвига и, соответственно, снижением вязкости разрушения при испытаниях на ползучесть и уменьшением длительности испытаний, что может привести к преждевременному разрушению изделий, подверженных воздействию электрического потенциала.

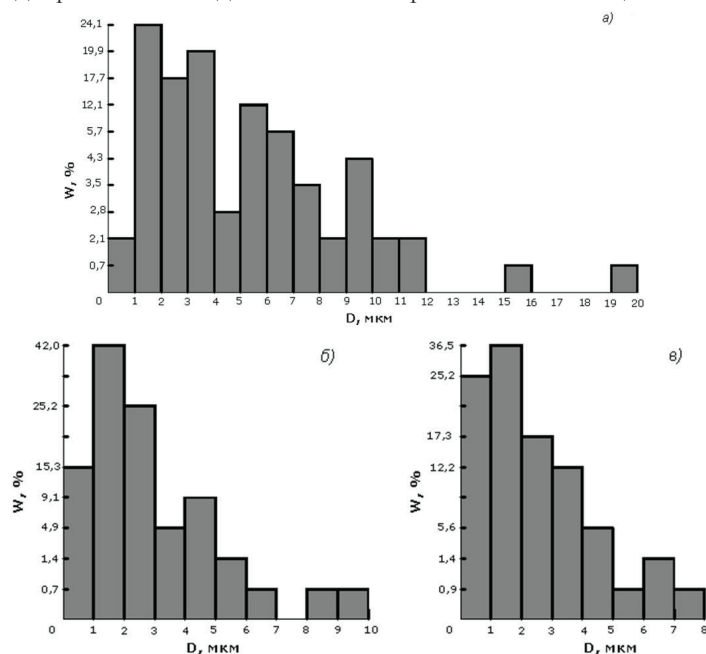


Рис. 4. Распределение диаметров ямок вязкого излома по размерам: без приложения потенциала (а); с приложением потенциала 1 В (б) и 5 В (в)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Троицкий О.А., Баранов Ю.В., Авраамов Ю.С. Физические основы и технологии обработки современных материалов. Т. 1. Ижевск, 2004. 590 с.
2. Невский С.А., Коновалов С.В., Громов В.Е. Влияние электрического потенциала на активационные параметры релаксации напряжений технически чистого алюминия // Вестник Тюменского государственного университета. 2010. №6. Серия «Физико-математические науки». С. 54-60
3. Коновалов С.В., Данилов В.И., Зуев Л.Б. и др. О влиянии электрического потенциала на скорость ползучести алюминия // ФТТ. 2007. Т. 49. Вып. 8. С. 1389-1291.
4. Коновалов С.В., Филиппев Р.А., Котова Н.В. и др. Влияние слабых энергетических воздействий на ползучесть металлов // Известия вузов. Черная металлургия. 2008. №12. С. 38-40.
5. Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф., Столбоушкина О.А. и др. Роль электрического потенциала в ускорении ползучести и формировании поверхности разрушения Al // Известия РАН. Серия физическая. 2009. Т. 73. № 9. С. 1315-1318.
6. Столбоушкина О.А., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф. и др. Особенности формирования дислокационной субструктуры при ползучести алюминия в условиях приложения потенциала // Перспективные материалы. 2011. №1. С. 47-52.

7. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Stolboushkina O.A. et al. Dislocation substructure evolution on Al creep under the action of the weak electric potential. *Materials Science and Engineering A*. 2010. V. 527. Pp. 858-861.

8. Коновалов С.В., Данилов В.И., Зуев Л.Б. и др. Автоматизированная установка для регистрации и анализа ползучести металлов и сплавов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2007. Т. 73. №8. С. 64-66.

9. Фрактография и атлас фрактограмм: справ. изд. / пер. с англ.; под ред. Дж. Феллоуза. М.: Metallurgija, 1982. 490 с.

10. Иванова, В.С., Шанявский А.А. Количественная фрактография. Усталостное разрушение. Челябинск, 1988. 400 с.

REFERENCES

1. Troickij O.A., Baranov Ju.V., Avraamov Ju.S. *Fizicheskie osnovy i tehnologii obrabotki sovremennyh materialov* [Principal Physics and Processing Technology of Advanced Materials]. Vol. 1. Izhevsk, 2004. 590 p. (in Russian).

2. Nevskij, S.A., Konovalov, S.V., Gromov, V.E. The Effect of Electric Potential on Activation Parameters of Stress Relaxation of Pure Aluminum. *Vestnik Tjumenskogo gosudarstvennogo universiteta — Tyumen State University Herald*. 2010. № 6. Pp. 54-60. (in Russian).

3. Konovalov, S.V., Danilov, V.I., Zuev, L.B. et al. On the Effect of Electric Potential on the Speed of Aluminum Creep. *Fizika tverdogo tela — Physics of Solids*. 2007. Vol. 49. Issue 8. Pp. 1389-1291. (in Russian).

4. Konovalov, S.V., Filip'ev, R.A., Kotova, N.V. et al. Influence of weak energy impacts on the creep of metals. *Izvestija vuzov. Chernaja metallurgija — Izvestija vuzov. Chernaja metallurgija*. 2008. № 12. Pp. 38-40. (in Russian).

5. Konovalov S.V., Ivanov Yu. F., Stolboushkina O.A., et al. The Importance of Electric Potential for Creep Acceleration and Formation of Al Destruction Surface. *Izvestija RAN — Bulletin of RAS*. 2009. Vol. 73. № 9. Pp. 1315-1318. (in Russian).

6. Stolboushkina, O.A., Konovalov, S.V., Ivanov, Ju.F. et al. Peculiarities of Formation of Dislocation Substructure at Aluminum Creeping with Applied Potential. *Perspektivnye materialy — Perspective materials*. 2011. № 1. Pp. 47-52. (in Russian).

7. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Stolboushkina O.A. et al. Dislocation substructure evolution on Al creep under the action of the weak electric potential. *Materials Science and Engineering A*. 2010. V. 527. Pp. 858-861.

8. Konovalov, S.V., Danilov, V.I., Zuev, L.B. et al. Automatic Installation for Registration and Analysis of Creep of Metals and Alloys. *Industrial Laboratory. Material Diagnostics*. 2007. Vol. 73. № 8. Pp. 64-66. (in Russian).

9. *Fraktografija i atlas fraktogramm: sprav. izd.* [Fractography and Fracture Pattern Atlas: Reference Book] / transl. from English; edit. by J. Fellows. M.: Metallurgija, 1982. 490 p. (in Russian).

10. Ivanova, V.S., Shanjavskij, A.A. *Kolichestvennaja fraktografija. Ustalostnoe razrushenie* [Quantitative Fractography. Fatigue Breakdown]. Cheljabinsk: Metallurgija, 1988. 400 p. (in Russian).