

ФИЗИКА ТВЁРДОГО ТЕЛА

УДК 53.098; 539.376

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПОВЕРХНОСТЬ РАЗРУШЕНИЯ АЛЮМИНИЯ ПРИ ПОЛЗУЧЕСТИ

© 2011 г. С.В. Коновалов¹, Д.В. Загуляев¹, Ю.Ф. Иванов², В.Е. Громов¹

¹ Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк

² Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск

gromov@physics.sibsiu.ru

Поступила в редакцию 07.07.2010

Методами сканирующей электронной микроскопии проведены исследования фрактографии поверхности разрушения технически чистого алюминия, разрушенного в условиях ползучести в магнитном поле. Показано, что в присутствии магнитного поля формирующийся рельеф поверхности разрушения (ямки вязкого разрушения) обладает меньшими средними размерами по сравнению с обычными условиями эксперимента.

Ключевые слова: магнитное поле, поверхность разрушения, ползучесть, алюминий.

Введение

Интенсивное развитие техники приводит к созданию все более мощных энергетических установок, создающих вокруг себя магнитные и электрические поля. Поскольку зачастую их элементы работают в условиях механических нагрузок (например, ползучесть), приводящих к разрушению, для прогнозирования остаточного ресурса их работы необходимо изучение поведения свойств металлов в условиях внешних энергетических воздействий.

Изучению влияния электрических полей на ползучесть металлов посвящено достаточное количество работ [1–3], и установлено, что наложение слабых потенциалов $\varphi = 1$ В уже сказывается на количественных параметрах, характеризующих структуру поверхности разрушения, в частности снижает размер зоны среза, формирует ямки сдвига и снижает вязкость разрушения [2, 3]. Хотя исследований, посвященных установлению влияния магнитного поля на пластические свойства немагнитных кристаллов достаточно [4–6], работ по анализу влияния магнитного поля на ползучесть значительно меньше.

Данная работа является продолжением наших исследований, представленных в [7], где было обнаружено снижение скорости деформации на линейном участке кривой ползучести на 56% при воздействии магнитным полем с ин-

дукцией 300 мТл по сравнению с ползучестью в обычных условиях. Для понимания физической природы указанного явления полезными могут быть результаты исследования эволюции поверхности разрушения, формирующейся в условиях ползучести.

Цель настоящей работы состояла в исследовании структуры поверхности разрушения алюминия и выявлении ее особенностей, формирующихся при ползучести во внешнем магнитном поле и без него.

Материал и методика исследования

В качестве материала для исследований был выбран поликристаллический технически чистый алюминий марки А 85, из которого готовились плоские образцы с размерами рабочей части $150 \times 5 \times 0.46$ мм³. Предварительная подготовка исходной структуры заключалась в рекристаллизованном отжиге при 770 К в течение 2 часов. В дальнейшем образцы при комнатной температуре подвергали ползучести с постоянным растягивающим напряжением $\sigma = 65$ МПа до разрушения ($\epsilon \approx 22\%$). Первая половина их (15 образцов) деформировалась в условиях внешнего магнитного поля с индукцией 0.3 Тл, вторая – в обычных условиях. Магнитное поле было направлено перпендикулярно оси растяжения.

Исследования поверхности разрушения в обычных условиях и в магнитном поле осуществляли методами сканирующей электронной микроскопии с помощью прибора SEM 515 Philips. Параметры поверхности разрушения определяли используя методы стереологии [8].

Результаты исследования и их обсуждение

Для поверхности изломов гладких образцов, испытанных на растяжение, характерны три зоны: волокнистая, радиальная и зона среза [9]. Волокнистая зона отвечает области медленного роста трещины. Она расположена в центральной области поверхности разрушения образца и окружает очаг разрушения, который обычно находится на оси растяжения или рядом с ней. Эта зона состоит из области случайно расположенных волокон. Распространение трещины в волокнистой зоне происходит в результате слияния микропор при разрушении перемычек между ними. Очаг разрушения расположен в центре волокнистой зоны. При переходе трещины от медленного роста к быстрому или нестабильному ее распространению образуются

радиальные рубцы, которые совпадают с общим направлением распространения трещины. Зона среза является областью, смежной со свободной поверхностью образца.

Макроскопический вид поверхности излома плоского образца алюминия, разрушенного при растяжении в условиях ползучести, приведен на рис. 1. Выявляются две зоны – волокнистая зона и зона среза. Этот факт указывает на то, что разрушение алюминия происходило в условиях стабильного роста трещины. Основную площадь поверхности разрушения занимает волокнистая зона, сформированная ямками разрушения, представляющими собой половину микропоры, через которую прошло разрушение. Зона среза в образце, разрушенном в обычных условиях, занимает незначительную (порядка 10%) часть поверхности разрушения (рис. 1а) и более выражена в образце, разрушенном в условиях внешнего магнитного поля (порядка 30%) (рис. 1б).

Типичные для испытанных образцов фрактограммы, демонстрирующие ямки разрушения, приведены на рис. 2. Вблизи ямок и на их внутренних поверхностях видны волнистые тонкие

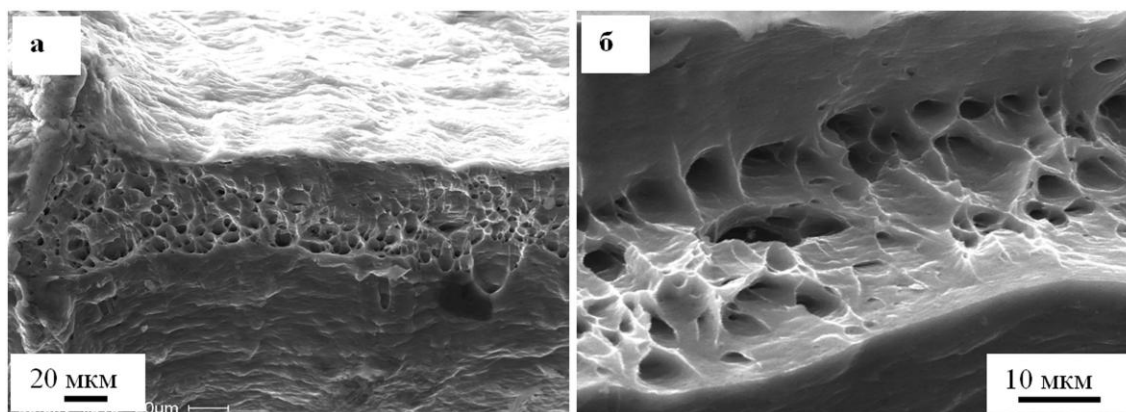


Рис. 1. Фрактограммы поверхности разрушения. Ползучесть без магнитного поля (а) и в присутствии внешнего магнитного поля (б)

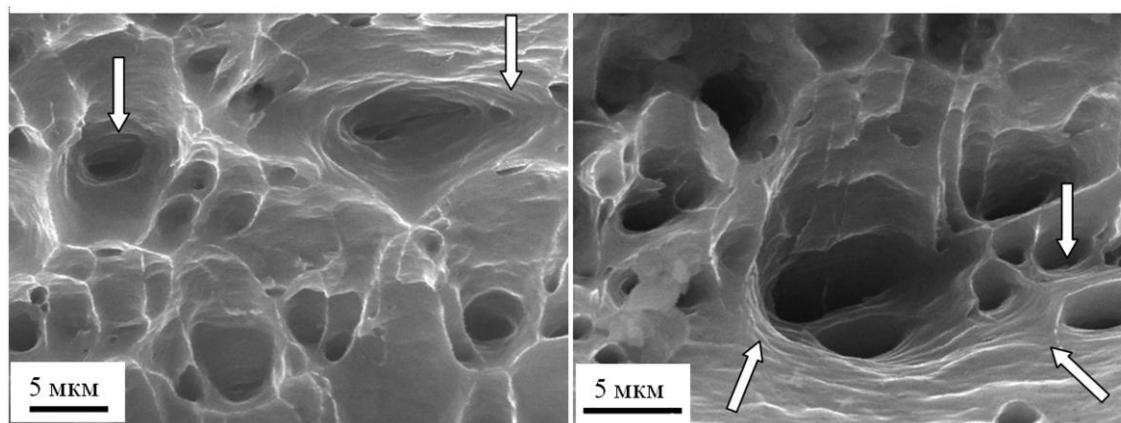


Рис. 2. Фрактограммы, демонстрирующие ямки разрушения

линии (линии указаны стрелками). Это свидетельствует о том, что рост ямок происходит путем скольжения материала по многим действующим системам. Следовательно, независимо от методики испытания на ползучесть, поверхности изломов технически чистого алюминия являются вязкими с большой плотностью полос скольжения и глубокими ямками, свидетельствующими о высокой локальной пластичности материала.

Ямки разрушения, как правило, разделяют на три группы – равноосные, ямки сдвига и ямки отрыва [9]. Зона боковых скосов часто содержит систему овальных ямок, вытянутых в одном и том же направлении – направлении сдвига (это ямки сдвига). Ямки отрыва формируются в условиях внецентрального напряженного состояния, присущего, например, образцам с надрезом, испытываемым в условиях плоской деформации. В этих условиях образуются вытянутые ямки, имеющие вид парабол, развернутых в направлении зарождения трещины. Характерные микрофотографии, демонстрирующие присутствие на поверхности разрушения алюминия различных видов ямок, приведены на рис. 3. Следует отметить, что в наших экспериментах ямки сдвига преимущественно формировались при ползучести алюминия в условиях присутствия внешнего магнитного поля.

Деформация алюминия в условиях ползучести приводит к формированию поверхности разрушения с широким диапазоном размеров ямок вязкого излома (рис. 2 и рис. 3). Выполненный в настоящей работе статистический анализ поверхности разрушения показал, что средний размер (диаметр) ямок вязкого излома зависит как от условий проведения эксперимента, так и от места их формирования (волокну-

стая зона или зона среза). А именно, в зоне волокнистого излома при ползучести без магнитного поля средний размер ямок вязкого излома 3.4 мкм; ползучесть в условиях внешнего магнитного поля приводит к уменьшению среднего размера ямок вязкого излома более чем в 2 раза (1.5 мкм). Одновременно с этим уменьшаются размеры ямок: в экспериментах без магнитного поля размер ямок изменялся в пределах от 1 до 9 мкм; присутствие магнитного поля приводит к существенному уменьшению предельных размеров ямок (0.25...5 мкм).

Зона среза в исследованных образцах также содержит ямки вязкого излома (ямки сдвига) (рис. 1, рис. 3а). Проведенные количественные исследования показали, что в этом случае средние размеры ямок вязкого излома независимо от условий проведения экспериментов несколько меньше ямок вязкого излома, формирующихся в зоне волокнистого излома. А именно, при испытаниях без магнитного поля средние размеры ямок вязкого излома 1.75 мкм (минимальные размеры 0.5 мкм; максимальные – 4 мкм); при разрушении образцов в присутствии магнитного поля – 1.1 мкм (минимальные размеры 0.25 мкм; максимальные – 3.75 мкм).

Считается, что размер ямок (диаметр и глубина) зависит от числа мест зарождения микропор и относительной пластичности матрицы [9, 10]. Чем больше мест зарождения, тем меньше размер ямок. Следовательно, ползучесть алюминия во внешнем магнитном поле приводит к увеличению числа мест зарождения ямок вязкого излома (микропор). Местами зарождения ямок вязкого излома являются частицы вторых фаз, внутрифазные (границы раздела зерен) и межфазные (границы раздела частица/матрица) границы раздела, внутризеренные дефекты (субзеренные границы, дислокации). Можно

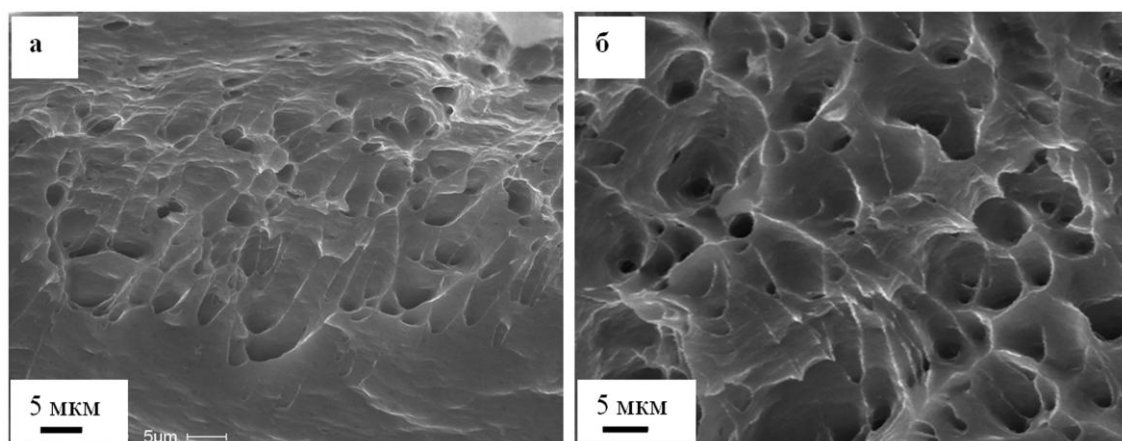


Рис. 3. Фрактограммы поверхности разрушения; а – ямки сдвига; б – ямки отрыва

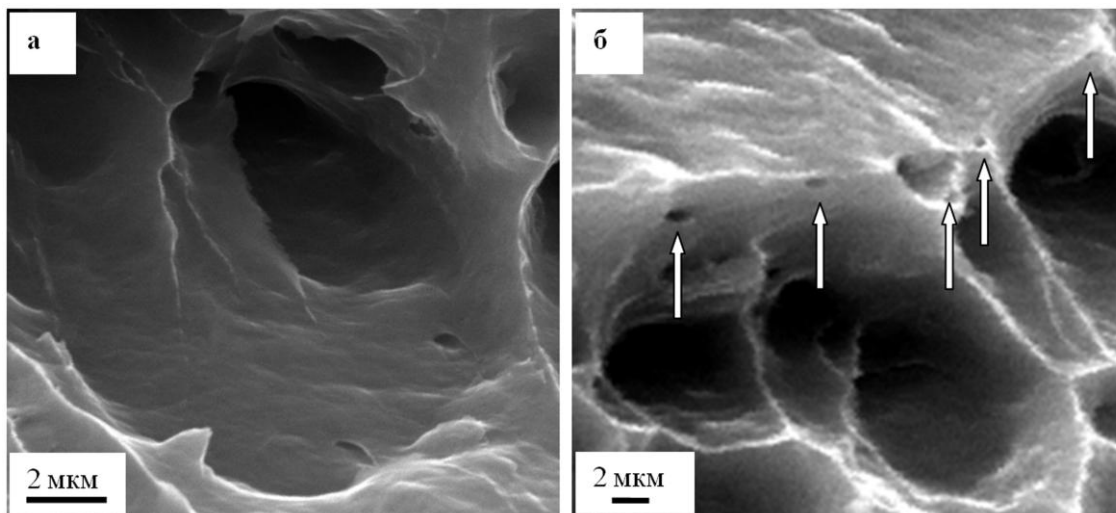


Рис. 4. Фрактография поверхности разрушения; а – гладкая поверхность разрушения, обусловленная так называемой вытяжкой; б – мелкие ямки, расположенные на гребнях отрыва (указаны стрелками)

ожидать, что внешнее магнитное поле не приводит (по-видимому, ввиду его сравнительной малости) к изменению фазового состава, размеров и морфологии частиц второй фазы, состояния и плотности границ зерен. В этом случае полученные результаты могут косвенно свидетельствовать о том, что магнитное поле оказывает влияние на эволюцию (скорость накопления и аннигиляции, механизмы зарождения и схему перестройки) дефектной субструктуры объема и приповерхностного слоя образца при ползучести алюминия по сравнению с ползучестью без внешнего магнитного поля.

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 [11], что повышение трещиностойкости сопровождается увеличением глубины ямок на поверхности изломов. Если предположить, что глубина ямок вязкого излома пропорциональна их размеру, то можно заключить, что наложение внешнего магнитного поля способствует некоторому снижению вязкости разрушения алюминия в условиях ползучести.

На больших ямках часто видны признаки деформации в виде серпантинного скольжения, волнистости (ряби), зоны вытяжки (рис. 2). Дальнейшая деформация по существу стирает детали рельефа (рис. 4а). Возникновение такой сравнительно безрельфной поверхности разрушения обусловлено так называемой вытяжкой. Иногда этот рельеф рассматривается как

результат декогезии по плоскости скольжения или вязкого скола.

Часто на пологих склонах крупных ямок, оконтуренных гребнями отрыва, располагаются чрезвычайно мелкие ямки (рис. 4б). В некоторых случаях отрыв может приводить к образованию плоских бесструктурных участков рельефа, напоминающих локальное расслоение в плоскости скольжения. Гребни отрыва обычно имеют острый край и соответственно этому обуславливают яркий контраст изображения в сканирующем электронном микроскопе (рис. 4).

Заключение

Выполнены исследования фрактографии поверхности разрушения алюминия, подвергнутого деформации в условиях ползучести. Установлено качественное подобие морфологии поверхности разрушения, формирующейся в экспериментах с присутствием магнитного поля и без него. Различия выявляются на количественном уровне анализа поверхности разрушения. Установлено, что в присутствии магнитного поля формирующийся рельеф поверхности разрушения (ямки вязкого разрушения) обладает меньшими средними размерами по сравнению с обычными условиями эксперимента. Последнее позволяет заключить, что магнитное поле приводит к некоторому снижению вязкости разрушения технически чистого алюминия при деформации в условиях ползучести, оказывая влияние на состояние дефектной субструктуры объема и поверхностного слоя материала.

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

Список литературы

1. Коновалов С.В., Данилов В.И., Зуев Л.Б. и др. // ФТТ. 2007. № 8. С. 1389–1391.
2. Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф., Столбоушкина О.А. и др. // Известия РАН. Серия физическая. 2009. Т. 73. № 9. С. 1315–1318.
3. Иванов Ю.Ф., Коновалов С.В., Столбоушкина О.А. и др. // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2010. № 1. С. 57–63.
4. Головин Ю.И. // ФТТ. 2004. № 5. С. 769–803.

5. Альшиц В.И., Даринская Е.В., Колдаева М.В. и др. // Кристаллография. 2003. № 5. С. 826–854.
6. Урусовская А.А., Альшиц В.И., Смирнов А.Е. и др. // Кристаллография. 2003. № 5. С. 855–872.
7. Загуляев Д.В., Коновалов С.В., Громов В.Е. // Вестник ЧелГУ. 2009. № 24. С. 49–53.
8. Чернявский К.С. Стереология в металловедении. М.: Металлургия, 1977. 208 с.
9. Фрактография и атлас фрактограмм: Справ. изд. Пер. с англ. / Под ред. Дж. Феллоуза. М.: Металлургия, 1982. 490 с.
10. Энгель Л., Клингеле Г. Растровая электронная микроскопия. Разрушение: Справочник. М.: Металлургия, 1986. 232 с.
11. Иванова В.С., Шанявский А.А. Количественная фрактография. Усталостное разрушение. Челябинск: Металлургия. Челябинское отделение, 1988. 400 с.

**THE EFFECT OF MAGNETIC FIELD
ON THE FRACTURE SURFACE OF ALUMINUM UNDER CREEP**

S.V. Konovalov, D.V. Zagulyaev, Yu.F. Ivanov, V.E. Gromov

A fractographic investigation using scanning electron microscopy techniques has been carried out of the fracture surface of technically pure aluminum destroyed in the magnetic field under creep conditions. It has been shown that in the presence of the magnetic field the relief of the fracture surface being formed (pits in ductile fracture) has smaller average sizes in comparison with the normal conditions of the experiment.

Keywords: magnetic field, fracture surface, creep, aluminum.