ФОРМИРОВАНИЕ ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ И ПОВЕРХНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИ ЧИСТОГО *AL* ПОД ДЕЙСТВИЕМ СЛАБЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕНЦИАЛОВ^{*}

Ю. Ф. Иванов, С. В. Коновалов, О. А. Столбоушкина, В. Е. Громов

Реферат. Методами сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии проведены исследования поверхности разрушения и дефектной субструктуры, формирующейся при ползучести в зоне разрушения образцов технически чистого алюминия. Показано, что структура, образующаяся в условиях ползучести при действии потенциала, характеризуется более высокой степенью самоорганизации дислокационной субструктуры в зоне разрушения образца, по сравнению с образцом, разрушенным при ползучести в обычных условиях.

Ключевые слова: ползучесть, алюминий, дефектная субструктура, поверхность разрушения, потенциал

Введение

Интерес к проблеме влияния внешних энергетических воздействий на прочность и пластичность материалов традиционно высок в последние годы [1]. Решение этой важной задачи, лежащей в основе разработки и создания новых высокопроизводительных процессов, во многом связано с пониманием физических механизмов деформирования с наложением полей и токов [2]. Как показывают итоги двух последних международных конференций по этой тематике, наметились и успешно развиваются два направления изучения этого явления: обработка короткими мощными токовыми импульсами деформируемого объекта и изменение электрического потенциала поверхности [3, 4].

Наиболее подробно изучено воздействие токовой импульсной обработки, которая, оказывая влияние на дефектную субструктуру, может изменять распределение внутренних напряжений, фазовый состав, зеренную структуру и, в конечном счете, существенно снижать сопротивление деформированию [1, 2]. Влияние электрического потенциала на пластичность металлов изучено значительно слабее, хотя в последние годы здесь наметился определенный прогресс [5-7]. Было выявлено ускорение ползучести Al, уменьшение стадии установившейся ползучести и снижение долговечности при наложении потенциала U = +1 В к изолированному образцу, подвергаемому испытанию на ползучесть. Такое же влияние было установлено при электрическом подключении к изолированному образцу металлических пластин (Cu, Fe, Pb, Zr, Cr, Ni, Ti) массой 5 кг, имеющих отличную от алюминия работу выхода электронов. Изменение скорости ползучести объяснялось изменением плотности поверхностной энергии образца.

Для понимания физической природы влияния электрического потенциала были необходимы прецизионные исследования эволюции дефектной субструктуры и поверхности разрушения, формирующихся в условиях ползучести, что и стало целью настоящей работы.

^{*} Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 гг.» (гос. контракт № П411), докладывалась на II российско-китайском международном семинаре «Действие электромагнитных полей на структуру и характеристики материалов», Москва, ИМАШ РАН, 27–29.05.2009 г.

Материал и методика исследования

Материалом исследования являлся технически чистый алюминий марки A85, химический состав которого в массовых процентах представлен в таблице.

Плоские образцы в форме «двойной лопатки» с размерами рабочей части $40 \times 6 \times 1,8$ мм подвергались рекристаллизационному отжигу по режиму T = 775 K, t = 2 часа.

Испытания на ползучесть проводились при T=300 К на жесткой универсальной испытательной машине *Instron-1185* при напряжении $\sigma = 62$ МПа. В процессе деформации с момента приложения нагрузки непрерывно фиксировалась общая деформация удлинения образца как функция времени $\varepsilon(t)$. Вид кривых ползучести не отличался от приведенных в [5–7].

Подведение электрического потенциала +1 В к образцу осуществлялось от внешнего стабилизированного источника постоянного тока Б5-43А при его электрической изоляции от зажимов испытательной установки. Статистический анализ проводили по 15 образцам, подвергнутым испытаниям на ползучесть, как с приложением электрического потенциала +1 В, так и без него. Приложение электрического потенциала +1 В к образцам, испытываемым на ползучесть, как и в [5–7], привело к увеличению скорости ползучести и снижению их долговечности.

Исследование дефектной субструктуры и поверхности разрушения алюминия проводили методами сканирующей и просвечивающей электронной дифракционной микроскопии



[8, 9]. Фольги готовили из тонких пластинок (рис. 1), вырезанных из верхней и нижней плоскостей образца, параллельно продольной оси, в непосредственной близости от поверхности разрушения.

Результаты исследования

Фрактография поверхности разрушения. На типичных для испытанных образцов фрактограммах вблизи ямок и на их внутренних поверхностях видны волнистые тонкие линии (на рис. 2, *а* линии указаны стрелками). Это свидетельствует о том, что рост ямок происходит путем скольжения материала по многим действующим системам. Следовательно, независимо от видов испытания на ползучесть, поверхности изломов технически чистого алюминия являются вязкими с большой плотностью полос скольжения и глубокими ямками, подтверждающими высокую локальную пластичность материала.

Ямки, как правило, разделяют на три группы – равноосные, ямки сдвига и ямки отрыва. 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 сложного напряженного состояния, присущего, например, образцам с надрезом, испытываемых 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, равноосных и сдвига, приведены на рис. 2, а и 2, б, соответственно. В наших экспериментах ямки сдвига формируются преимущественно при ползучести алюминия в условиях наложения потенциала ±1 В.

Испытания на ползучесть технически чистого алюминия приводят к формированию поверхности разрушения с широким диапазоном размеров ямок вязкого излома (см. рис. 2, *a*). При деформации без наложения потенциала средний размер ямок вязкого излома 1,84±1,3 мкм; наложение потенциала приводит к уменьше-

Таблица

Химический состав технически чистого алюминия марки .	$A\delta$	35
---	-----------	----

Si	Fe	Pb	Ga	Zn	V	Ti	Ni	Mn	Mg	Cu	Al
0,15	0,07	0,016	0,01	0,008	0,005	0,0035	0,0035	0,0025	0,002	0,0014	Ост

нию среднего размера ямок вязкого излома в ~1,25 раза. Одновременно с этим уменьшается и интервал размеров ямок: в экспериментах без потенциала максимальный размер ямок достигал 7 мкм; наложение потенциала приводит к уменьшению максимального размера ямок до 5 мкм.

Размеры ямок определяются числом мест зарождения микропор и относительной пластич-



Рис. 2. Фрактограммы поверхности разрушения технически чистого алюминия: а, в – без потенциала; б – при наложении потенциала U = +1 В

ностью матрицы [10]. Рост числа мест зарождения микропор приводит к меньшему размеру ямок. То есть, наложение потенциала +1 В приводит к увеличению мест зарождения ямок вязкого излома и способствует снижению вязкости разрушения.

На больших ямках часто видны признаки деформации в виде серпантинного скольжения, волнистости (ряби), зоны вытяжки. Дальнейшая деформация по существу стирает детали рельефа (см. рис. 2, δ). Возникновение такой сравнительно безрельефной 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 (указаны стрелками на рис. 2, *в*). Гребни отрыва обычно имеют острый край и соответственно этому обусловливают яркий контраст изображения в сканирующем электронном микроскопе.

Дефектная субструктура исходного материала. В исходных образцах, представляющих собой поликристаллические агрегаты, основным типом дислокационной субструктуры является сетчатая, объемная доля которой составляет 0,68; существенно меньший объем занимает ячеистая субструктура (~0,18) и субструктура дислокационного хаоса (~0,11); остальное – дислокационные жгуты и фрагменты (рис. 3). Как правило, дислокационные ячейки и фрагменты располагаются вдоль границ зерен. Сетчатая дислокационная субструктура присутствует также в объеме ячеек; в объеме фрагментов выявляется субструктура дислокационного хаоса.

Границы ячеек и фрагментов – рыхлые с хорошо различимой дислокационной структурой (см. рис. 3, e). Скалярная плотность дислокаций, усредненная по объему материала с учетом указанных типов дислокационной субструктуры, – 1,4·10¹⁰ см². Средние размеры дислокационных ячеек составляют ~480 нм, фрагментов – ~600 нм.

Дефектная субструктура зоны разрушения (ползучесть без подведения потенциала). Ползучесть алюминия приводит к формированию в зоне разрушения полосовой и субзеренной (рис. 4) структур. Основным типом структуры является субзеренная, занимающая в условиях ползучести без потенциа-



Рис. 3. Дислокационная субструктура образцов алюминия перед испытаниями на ползучесть: а – структура дислокационного хаоса; б – дислокационные сетки; в – жгуты; г – ячейки; д – фрагменты; е – дислокационная субграница

ла ~0,6 объема материала (рис. 5). Оба типа дислокационной субструктуры формируются у границ зерен. Полосовая субструктура преимущественно фрагментирована. Поперечные размеры фрагментов изменяются в пределах 450–750 нм и совпадают с размерами полосовой субструктуры, продольные размеры – 0,8–1,3 мкм (скалярная плотность дислокаций 1,3·10¹⁰ см²).

В объеме полосовой субструктуры присутствует субструктура дислокационного хаоса и дислокационные сетки; в объеме субзерен – хаотически распределенные дислокации (см. рис. 4). Субзерна имеют средний размер 1,5 мкм. Наряду с полосовой и субзеренной структурой в зоне разрушения выявлены зерна с сетчатой дислокационной субструктурой (их объемная доля составляет ~0,33) (см. рис. 5).

Скалярная плотность дислокаций сетчатой субструктуры – 2,2·10¹⁰ см². Особенностью зерен с сетчатой субструктурой является наличие изгибных экстинкционных контуров. В зернах с полосовой и субзеренной структурами такие контуры не были выявлены.

Подполировка фольги (удаление от зоны разрушения дополнительно на 500–1000 мкм), полученной из зоны разрушения, привела к некоторому перераспределению соотношения объемов материала с данными типами субструктур. А именно, субзеренная структура



Рис. 4. Субзеренная структура, формирующаяся в зоне разрушения образцов алюминия (ползучесть без потенциала)

занимает ~0,23 объема; сетчатая субструктура – ~0,47 объема; остальная часть приходится на полосовую субструктуру. Усредненная по типам дислокационной субструктуры скалярная плотность дислокаций в зоне разрушения составила 1,62·10¹⁰ см²; вдали от зоны разрушения – 1,9·10¹⁰ см⁻² (кривая *1* на рис. 6).

Дефектная субструктура зоны разрушения (ползучесть при подведении потенциала). Как и в случае ползучести без подведения потенциала, в зоне разрушения формируется структура, представленная субзернами, зернами с полосовой, ячеистой и сетчатой субструктурами (см. рис. 5). Основным типом субструктуры в зоне разрушения является субзеренная структура ~0,85 (средние размеры субзерен – 0,98 мкм); заметно меньший объем материала занимает сетчатая субструктура ~0,10; остальное – полосовая и ячеистая субструктуры в примерно равных пропорциях. Усредненная по типам дислокационной субструктуры скалярная плотность дислокаций составляет 1,37·10¹⁰ см⁻².

Характерной особенностью субзерен, формирующихся при ползучести под потенциалом, являются, во-первых, сравнительно высокий угол азимутальной составляющей угла полной разориентации ~9 град., и, во-вторых, наличие сравнительно большого количества изгибных экстинкционных контуров (рис. 7). Присутствие изгибных контуров указывает на кривизнукручение кристаллической решетки материала, т.е. на поля напряжений, формирующиеся в субзернах [8, 9]. Практически всегда изгибные контуры начинаются и заканчиваются на границах раздела зерен и субзерен (см. рис. 7). Последнее указывает на источник кривизны-кручения материала – несовместность пластической деформации зерен и субзерен.

Подполировка фольги, полученной из зоны разрушения, привела к некоторому перераспределению соотношения объемов материала с данными типами субструктур. А именно, субзеренная структура составляет ~0,12; сетчатая субструктура – ~0,53; полосовая – 0,19; остальное – ячеистая субструктура. Усредненная по типам дислокационной субструктуры скалярная плотность дислокаций – 1,53·10¹⁰ см⁻² (см. рис. 6, кривая 2).

Сопоставляя структуры, формирующиеся



Рис. 5. Объемная доля P_v дислокационных субструктур, формирующихся в алюминии: а – исходное состояние; б – ползучесть без приложения электрического потенциала; в – ползучесть с приложением потенциала; 1 – субструктура дислокационного хаоса; 2 – фрагментированная субструктура; 3 – ячеистая субструктура; 4 – сетчатая субструктура; 5 – полосовая субструктура; 6 – субзерна

в алюминии при ползучести с приложением электрического потенциала и без него, можно отметить, что поперечные размеры изгибных экстинкционных контуров в первом случае в 3–5 раз уже, чем во втором. Следовательно, можно констатировать, что упругие напряжения, формирующиеся в материале в зоне разрушения при ползучести с подключением потенциала в несколько раз выше, чем в зоне разрушения материала при ползучести без воздействия [8, 10].

Ползучесть в условиях воздействия электрического потенциала приводит к стимулированию процесса самоорганизации дислокационной субструктуры, что несколько снижает скалярную плотность дислокаций, т.е. плотность дислокаций, распределенных в объеме материала, а не связанных с субграницами различного типа.

Кроме того, подведение электрического потенциала при ползучести приводит к более высокой степени самоорганизации дислокационной субструктуры в зоне разрушения образца, по сравнению с материалом, разрушенным при ползучести в обычных условиях (см. рис. 5), что приближает процесс разрушения.

Соответственно этому, скалярная плотность дислокаций (плотность дислокаций, распределенных в объеме материала) в зоне разрушения



Рис. 6. Зависимость скалярной плотности дислокаций р от расстояния до поверхности разрушения X: 1 – ползучесть без подведения потенциала; 2 – ползучесть с подведением потенциала

при приложении электрического потенциала ниже, чем эта характеристика в зоне разрушения в условиях обычной ползучести (см. рис. 6). Очевидно, дислокации в условиях ползучести при приложении потенциала сосредоточены в основном в субграницах. Судя по относительной ширине изгибных экстинкционных контуров ползучесть при подведении потенциала сопровождается существенным увеличением кривизны-кручения кристаллической решетки алюминия. Источниками кривизны-кручения кристаллической решетки является несовместность деформации субзерен и зерен.

Заключение

Таким образом, приложение электрического потенциала +1 В оказывает влияние на эволюцию дефектной субструктуры при ползучести технически чистого алюминия, а также приводит к увеличению мест зарождения ямок вязкого излома.

Изменение электрического потенциала поверхности алюминия сопровождается повышением степени самоорганизации дислокационной субструктуры, что, очевидно, и способствует снижению вязкости разрушения материала. Последнее может быть связано с изменением плотности поверхностной энергии [11] и также другими эффектами на микроуровне. Для установления более полной картины влияния электрических потенциалов на процесс ползучести и разрушения *Al* полезными были бы данные по подвижности и размножению дислокаций в этих условиях.



Список литературы

- Физические основы и технологии обработки современных материалов / О.А. Троицкий, Ю.В. Баранов, Ю.С. Авраамов, А.Д. Шляпин. Т. 1. – Ижевск: ИКИ, 2004. – 590 с.
- Электростимулированная пластичность металлов и сплавов / В.Е. Громов, Л.Б. Зуев,
 Э.В. Козлов и др. М.: Наука, 1996. 293 с.
- Electroplastic Effect in Metals. Proceeding of the China-Russia Symposium / Ed.: V. Gromov, G. Tang. – Novokuznetsk: SibSIU, 2007. – 319 p.
- Влияние электромагнитных полей на структуру и характеристики материалов: сб. материалов II Междунар. российско-китайского семинара / Под ред. О.А. Троицкого. – М.: Изд-во ИМАШ РАН, 2009. – 104 с.
- О влиянии электрического потенциала на скорость ползучести алюминия / С.В. Коновалов, В.И. Данилов, Л.Б. Зуев и др. // Физика твердого тела. 2007. Т. 49. Вып. 8. С. 1389–1391.
- Макролокализация пластической деформации при ползучести мелкокристаллического алюминия / В.И. Данилов, С.В. Коновалов,

С.В. Журавлева и др. // ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып. 3. С. 92–95.

- Влияние электрического потенциала на процесс деформации алюминия / С.В. Коновалов, В.И. Данилов, Л.Б. Зуев и др. // Физическая мезомеханика. 2006. Т. 9. С. 103–106.
- Электронная микроскопия тонких кристаллов / П. Хирт, Р. Хови, Р. Николсон и др. – М.: Мир, 1968. – 574 с.
- Дальнодействующие поля напряжений, кривизна-кручение кристаллической решетки и стадии пластической деформации. Методы измерений и результаты / Н.А. Конева, Э.В. Козлов, Л.И. Тришкина и др. // Новые методы в физике и механике деформируемого твердого тела: сб. труд. междунар. конф. – Томск: Изд-во ТГУ, 1990. – С. 83–93.
- 10. Физика и механика волочения и объемной штамповки / В.Е. Громов, Э.В. Козлов, В.И. Базайкин и др. М.: Недра, 1997. 293 с.
- Лихтман В.И., Щукин У.Д., Ребиндер П.А. Физико-химическая механика металлов. – М.: Изд-во АН СССР, 1962. – 303 с.

ИВАНОВ Доктор физико-математических наук, профессор, старший научный сотрудник Института сильноточной электроники Сибирского отделения Российской Юрий академии наук. Область научных интересов – физическое материаловедение, Федорович модификация неорганических материалов пучками заряженных частиц и потоками плазмы. Автор более 1000 публикаций, включая 9 монографий. E-mail: yufi@mail2000.ru Тел. (3822) 491713 Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры физики Сибирского го-КОНОВАЛОВ Сергей

Валерьевич

E-mail: konovalov@physics.sibsiu.ru Тел. (3843) 784367, факс (3843) 465792

сударственного индустриального университета. Область научных интересов физика конденсированного состояния, физика прочности и пластичности материалов в условиях внешних энергетических воздействий. Автор свыше 200 научных работ, включая 6 монографий.

СТОЛБОУШКИНА Оксана

Андреевна

E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru Тел. (3843) 784366, факс (3843) 465792

ГРОМОВ Виктор

Евгеньевич

E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru Тел. (3843) 462277, факс (3843) 465792

Аспирантка кафедры физики Сибирского государственного индустриального университета. Область научных интересов – ползучесть металлов и сплавов в условиях внешних энергетических воздействий. Автор более 10 публикаций, посвященных физике прочности и пластичности поликристаллических материалов.

Доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики Сибирского государственного индустриального университета. Область научных интересов – физическое материаловедение, физика прочности и пластичности материалов в условиях внешних энергетических воздействий. Автор более 1900 публикаций, включая 31 монографию.

Материал поступил в редакцию 16.06.2009