ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА ПРИ ДЕЙСТВИИ ИМПУЛЬСНОГО ТОКА*

В.В. Столяров, И.Г. Бродова

Изучено влияние плотности тока на деформируемость и упрочнение в процессе прокатки сплава АДЗЗ системы AI–Mg–Si. Установлено, что прокатка с малой плотностью тока (до 30 А/мм²) повышает деформацию до разрушения и уменьшает интенсивность деформационного упрочнения; увеличение плотности тока до 400 А/мм² снижает деформируемость материала, что обусловлено оплавлением эвтектики и возникновением микротрещин по границам зерен и субзерен.

Ключевые слова: прокатка, деформируемость, упрочнение, алюминиевый сплав, импульсный ток, наноструктурное состояние.

Введение

Среди различных видов обработки металлов давлением деформация при действии тока занимает особое место [1–3]. Считается, что в основе данной технологии – сочетание ряда эффектов (электронный ветер, Джоулев нагрев, пинч-эффект, скин-эффект и др.). Вместо традиционного нагрева до деформации или в процессе деформации для повышения технологической пластичности заготовки используется электрический ток (постоянный, переменный, импульсный). В зависимости от режима тока деформация может осуществляться при комнатной или более высокой температуре.

Многими исследователями было обнаружено, что для структурно-однородных крупнозернистых материалов (чистых металлов и сплавов) напряжение деформирования при импульсным током снижается, прокатке с а деформируемость материалов повышается [4–6], например в крупнозернистых титановых сплавах TiNi и BT6 в 3-5 раз с традиционным деформационным упрочнением [4]. При этом увеличение мощности тока (плотности тока и длительности импульса) приводило к росту деформации до разрушения [5]. Для ультрамелкозернистого сплава титана ВТ1-0 в отличие от крупнозернистых деформация с током способствует разупрочнению, вызванному динамической рекристаллизацией и ростом зерен вследствие снижения температуры рекристаллизации [6]. Деформируемость алюминиеволитиевого сплава 1463 в случае прокатки с постоянным током существенно не отличается от деформируемости при обработке без тока, но при действии импульсного тока наблюдается повышение пластичности, которое, как сказано в работе [7], связано с растворением упрочняющей фазы вследствие теплового эффекта.

Однако для химически неоднородных или структурно-неоднородных материалов подобные исследования практически отсутствуют. Вместе с тем, для ряда сплавов эвтектических систем, например системы Al-Mg-Si, задача повышения деформируемости сплавов при комнатной температуре является актуальной.

Цель данной работы – исследование деформационного упрочнения, деформируемости и структуры сплава АД33 при пластической деформации и действии импульсного тока.

Материал и методы исследования

Сплав АД33 (авиаль) относится к деформируемым термически упрочняемым сплавам системы Al–Mg–Si. Химический состав сплава приведен в таблице. Основными фазами сплава являются α (Al), Mg₂Si, Si. Критические температуры образования трещин в сплаве составляют 440–510 °C. Образцы-полосы размером 2×5×150 мм подвергали предварительной закалке на твердый раствор и естественному ста-

39

^{*} Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 12-02-00101_а) и Минобрнауки (госконтракт №14.513.11.0047).

рению, а затем прокатке при комнатной температуре с импульсным током на двухвалковом стане, оборудованном генератором импульсного тока.

Деформация осуществлялась со скоростью 5 см/с в пошаговом режиме при регулируемом разовом обжатии образца по толщине, соответствующем ее уменьшению не более чем на 50 мкм. После каждого шага прокатки образцы охлаждали в воде во избежание влияния возможного нагрева. Для однородности деформации образцы поворачивали на 180 °С относительно продольной оси и меняли направление прокатки на противоположное. Прокатку вели до разрушения образцов. Истинную деформацию при прокатке вычисляли по изменению площади поперечного сечения полосы:

$$e = \ln S_0 / S_{\nu}$$

где S_0 , S_k – площади поперечного сечения полосы до прокатки и после нее.

В экспериментах плотность тока варьировали от 30 до 400 А/мм² с частотой 1000 Гц и длительностью импульса 120 мкс. В пределах каждого опыта плотность тока была постоянной.

Металлографические исследования проводили на оптическом микроскопе Neophot-32, электронно-микроскопические исследования – на электронном просвечивающем микроскопе JEM-200CX. Микротвердость h измеряли на приборе ПМТ-3 при нагрузке 0,2 H с погрешностью не более 10 %.



Рис. 1. Влияние плотности тока *j* на истинную деформацию сплава АД33 *е*

Экспериментальные результаты

На рис. 1 приведена зависимость истинной деформации *е* сплава АД33 от плотности тока *j*. При малой плотности тока (30 А/мм²) деформация *е* незначительно повышается, однако дальнейшее увеличение плотности тока до 400 А/мм² вызывает резкое снижение деформации, что не типично для многих структурнооднородных материалов.

На рис. 2 приведена зависимость микротвердости сплава АДЗЗ, измеренной до прокатки с импульсным током разной плотности и после нее, от деформации *е*. Угол наклона прямых отражает степень деформационного упрочнения сплава. При всех режимах тока сплав в процессе прокатки упрочняется, однако интенсивность упрочнения – разная. Наиболее сильное упрочнение сплава наблюдается при *j*=100 А/мм². Увеличение и уменьшение плотности тока относительно этого значения приводит к снижению интенсивности упрочнения.

В исходном состоянии сплав имеет крупнозернистую структуру с размером макрозерна 500–600 мкм (рис. 3, a). Внутри зерен присутствуют дендритные ячейки размером до 50 мкм с границами, имеющими ликвационные зоны эвтектического состава (рис. 3, δ). При прокатке без тока происходит удлинение зерен вдоль направления прокатки и формирование неоднородной полосовой структуры с распределением эвтектики по границам субзе-



Рис. 2. Влияние истинной деформации сплава АД33 до разрушения *е* на микротвердость *h*:

I – при *j*=100 А/мм²; 2 – при *j*=400 А/мм²; 3 – при *j*=0; 4 – при *j*=30 А/мм²

лимический состав сплава АДЭЗ	Химический	состав	сплава	АД33
-------------------------------	------------	--------	--------	------

Содержание основных элементов, %				Содержание примесей, %				
Mg	Si	Cu	Cr	Al	Fe	Cu	Mn	Zn
0,80–1,20	0,4–0,8	0,15-0,40	0,15-0,35	Остальное	0,7	0,1	0,15	0,25

40

КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

рен (рис. 4, *a*). Внутри фрагментов в просвечивающем микроскопе видна ячеистая субструктура с широкой сеткой малоугловых границ, образованных дислокациями (рис. 4, *б*).

Прокатка с плотностью тока j=30 А/мм² изменяет картину структурообразования. В приграничных областях ячеек сохраняется высокая плотность дислокаций (рис. 5, *a*). На стыке субзерен в области локализации сдвиговой деформации зарождаются и растут рекристаллизованные зерна (рис. 5, δ).

Вследствие раннего разрушения влияние высокой плотности тока (100 и 400 А/мм²) на микроструктуру сплава изучали на образцах с малыми истинными деформациями (e=0,3...0,5). В результате обработки в микроструктуре наряду с деформированными фрагментами, имеющими ячеистую субструктуру (рис. 6, *a*), образуются вытянутые вдоль направления прокатки полосы с ультрамелкозернистой структурой (рис. 6, *б*). На рис. 6, *б* отмечены границы одной из полос, имеющей ширину порядка 1 мкм, а на рис. 6, *в* показана соответствующая полосе кольцевая микродифракция. Равномерно расположенные по окружностям точечные

рефлексы, свидетельствующие о преобладании большеугловых границ, а также выравнивание деформационного контраста и четкое очертание зерен, послужили основанием для предположения о том, что зерна сформировались в процессе динамической рекристаллизации.

Обсуждение результатов

Деформируемость сплава при прокатке с током малой плотности (30 А/мм²) незначительно повышается по сравнению с образцами, прокатанными без тока (см. рис. 1). Предполагается, что это вызвано релаксацией напряжений в результате наблюдаемой частичной рекристаллизации (см. рис. 5).

Необычным впервые обнаруженным в работе фактом является снижение деформируемости сплава АДЗЗ при повышении плотности тока более 30 А/мм² (см. рис. 1). Причиной снижения деформируемости является значительная структурная и химическая неоднородность сплава между матрицей и ликвационными зонами эвтектического состава. Эти зоны имеют низкие температуру плавления и теплопроводность по сравнению с матрицей и



Рис. 3. Макро- (а) и микроструктура (б) сплава АДЗЗ в исходном состоянии



Рис. 4. Микроструктура сплава АДЗЗ после прокатки без тока (при *e*=1,9), полученная при оптической металлографии (*a*) и просвечивающей микроскопии (*б*)



Рис. 5. Микроструктура сплава АД33 после прокатки с током (при *j*=30 А/мм²; *e*=1,6): *a* – субзерна; *б* – рекристаллизованное зерно



Рис. 6. Тонкая структура после прокатки с током (при *j*=400 А/мм²; *e*=0,3): *a*, *б* – светлое поле; *в* – электронограмма

при заметном тепловом эффекте и благоприятной ориентации по направлению тока могут плавиться. Действительно, эвтектические прослойки по границам зерен и субзерен при прокатке с током большой плотности частично оплавляются, что приводит к появлению большого количества мелких пор. В результате слияния пор формируются трещины, четко выявляемые на нетравленых шлифах (рис. 7).

С увеличением плотности тока повышается температура локального разогрева, увеличиваются размеры пор по границам зерен, образуя «ветвистые» трещины, распространяющиеся чаще всего поперек направления прокатки. Вероятнее всего, именно образование трещин в эвтектике ответственно за снижение деформационной способности структурнонеоднородного сплава АД33.

При низкой плотности тока (30 А/мм²) деформационное упрочнение снижается по сравнению с прокаткой без тока (см. рис. 1), что типично для большинства структурнооднородных материалов [6]. Неоднозначное поведение деформационного упрочнения при плотности тока 100 и 400 А/мм² пока трудно объяснить, поэтому необходимо проведение дальнейших исследований. Возможно, сплав АД33 следует рассматривать как смесь двух структурных составляющих (матрица и эвтектика), каждая из которых под действием тока упрочняется по своему закону, особенно при значительном тепловом эффекте, вызванном высокой плотностью тока.

Интересным результатом является обнаружение локальных областей (полос) с наноструктурой в образцах, прокатанных с высокой плотностью тока (см. рис. $6, \delta$). По морфологическим признакам такие области похожи на «каналы деформации», которые являются характерной особенностью структурообразования при деформационной обработке с наложением токовых импульсов [8]. Это области локализации деформации, в которых имеет место локальный разогрев материала. В сталях такие полосы образованы фрагментированной структурой, а в более легкоплавких алюминиевых сплавах с высокой энергией дефекта упаковки – рекристаллизованной структурой.

Выводы

Показано, что сплав АД33 обладает лучшей деформируемостью и наименьшим деформационным упрочнением при прокатке с низкой плотностью тока (30 А/мм²) по сравнению с прокаткой без тока. Повышение деформируемости и снижение интенсивности упрочнения



Рис. 7. Трещины по границам зерен

обусловлено релаксацией напряжений в результате частичной рекристаллизации.

Снижение деформируемости сплава АД33 при увеличении плотности тока с 30 до 400 А/мм² обусловлено тепловым эффектом импульсного тока, вызывающим оплавление эвтектики и появление микротрещин по границам зерен и субзерен.

При плотности тока 400 А/мм² на фоне фрагментированной структуры обнаружены локальные «каналы деформации» с рекристаллизованными зернами размером 100 нм.

Заключение

Природа сплавов, подвергаемых деформации с импульсным током, влияет на их деформационное поведение. Увеличение плотности импульсного тока приводит к аномальному уменьшению деформируемости в алюминиевом сплаве АД33, в отличие от титановых сплавов, в которых деформируемость повышается. Данный эффект, обусловленный тепловым действием тока, необходимо учитывать при разработке технологий обработки металлов давлением с введением тока.

Список литературы

- Баранов Ю.В., Троицкий О.А., Авраамов Ю.С., Шляпин А.Д. Физические основы и технологии обработки современных материалов (теория, технология, структура и свойства). В 2 т. – М. – Ижевск: Институт компьютерных технологий, 2004. – 590 с.
- Conrad H. Electroplasticity in metals and ceramics // Materials Science and Engineering. 2000. A287. P. 276–287.
- 3. *Stolyarov V., Ugurchiev U., Trubitsyna I., et al.* Severe electroplastic deformation of TiNi alloy // Journal of High Pressure Physics and Technique. 2006. Vol. 16. No. 4. P. 64–67.
- 4. *Столяров В.В.* Роль внешних воздействий в наноструктурных титановых сплавах // Известия РАН. Сер. физическая. 2012. Т. 76. № 1. С. 108–113.
- 5. Угурчиев У.Х., Столяров В.В. Деформируемость и микротвердость крупнозернистых титановых сплавов при прокатке с током // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2012. №5. С. 66–69.
- Stolyarov V.V. Electroplastic effect in nanostructured titanium alloys // Rev. Adv. Mater. Sci. 2012. No. 31. C. 14–34.
- Юрьев В.А., Баранов Ю.В., Столяров В.В. и др. Влияние электропластической обработки на структуру алюминий-литиевого сплава 1463 // Известия РАН. Сер. физическая. 2008. Т. 72. №9. С. 1317–1319.
- Громов В.Е., Зуев Л.Б., Козлов Э.В. и др. Электростимулированная пластичность металлов и сплавов. – М.: Недра, 1996. – 293 с.

Материал поступил в редакцию 20.03.2013

СТОЛЯРОВ Владимир Владимирович

E-mail: vlstol@mail.ru Тел.: (495) 623-42-37

БРОДОВА Ирина Григорьевна

E-mail: **ibrodova@mail.ru** Тел.: **(3433)78-36-11** Профессор, доктор технических наук, главный научный сотрудник Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. Сфера научных интересов – физическое материаловедение, наноструктурные материалы. Автор более 250 научных работ.

Профессор, доктор технических наук, главный научный сотрудник Института физики металлов УрО РАН. Сфера научных интересов – структурно-фазовые превращения в алюминиевых сплавах при внешних воздействиях. Автор более 180 научных статей.