

© И.Г. Ширинкина, В.В. Астафьев, Т.И. Яблонских, И.Г. Бродова, 2012 г.
Институт физики металлов УрО РАН,
г. Екатеринбург

© А.А. Попова, В.В. Столяров
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН,
г. Москва
shirinkina@imp.uran.ru

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧЕСКОЙ ПРОКАТКОЙ*

При разработке инновационных технологий создания наноструктурных материалов методами пластической деформации важное значение приобретает электропластическая прокатка (ЭПП).

Исследования, проведенные на меди, титане и сплавах с памятью формы показали, что после ЭПП повышается деформируемость материалов, возрастают их механические свойства.

В данной работе рассмотрены особенности структурообразования в процессе ЭПП алюминиевых сплавов Al-4 %Cu и АД33 (Al-Mg-Si). Оба сплава относятся к эвтектическим системам и кристаллизуются с образованием дендритных зерен Al-твердого раствора и ликвационных фаз эвтектической природы по их границам.

Исходные образцы в форме пластин с размерами 2 x 5 x 150 мм были прокатаны с током и без тока. Прокатка с применением импульсного тока велась на двухвалковом прокатном стане при комнатной температуре со скоростью 4 см/с в пошаговом режиме при регулируемом разовом обжатии по толщине (~ 25 мкм) при плотности однополярного импульсного тока $j = 30, 100, 320$ и 400 А/мм², длительности импульса 120×10^{-6} с и частотой 800–1000 Гц.

Металлографические исследования показали, что микроструктура образцов из сплава АД 33, полученных при разных режимах ЭПП, зависит от степени деформации и плотности тока. При прокатке без тока до $\epsilon \geq 1,3$ макрозерна размером 500 мкм постепенно заменяются полосовой структурой, состоящей из удлиненных деформированных зерен, а микротвердость возрастает на 30 %. При $\epsilon = 5$ ширина полос уменьшается

* Электронно-микроскопические исследования выполнены в отделе электронной микроскопии ЦКП ИФМ УрО РАН «Испытательный центр нанотехнологий и перспективных материалов».

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ (проект № 12-02-00101).

до 90–140 мкм, а внутри них формируются участки рекристаллизованных зерен размером до 10 мкм. H_V уменьшается с 950 до 800 МПа.

ЭПП с плотностью тока $j = 30 \text{ А/мм}^2$ при степени деформации $\epsilon = 1,6$ слабо влияет на трансформацию макроструктуры. В результате ЭПП также формируется полосовая структура с размерами и твердостью, значения которых близки для прокатки без тока. Наиболее существенные изменения макроструктуры были обнаружены при ЭПП с более высокой плотностью тока. С увеличением плотности тока до 400 А/мм^2 размер макрозерен меняется незначительно, однако внутри полос формируется структура с размером субзерен порядка 100 нм, что приводит к повышению микротвердости до 1000 МПа (рис. 1).

Таким образом, все деформированные образцы из сплава АД 33 имеют сильно наклепанную структуру с высокой плотностью дислокаций. С ростом плотности тока за счет динамической рекристаллизации появляются зоны с наноструктурой.

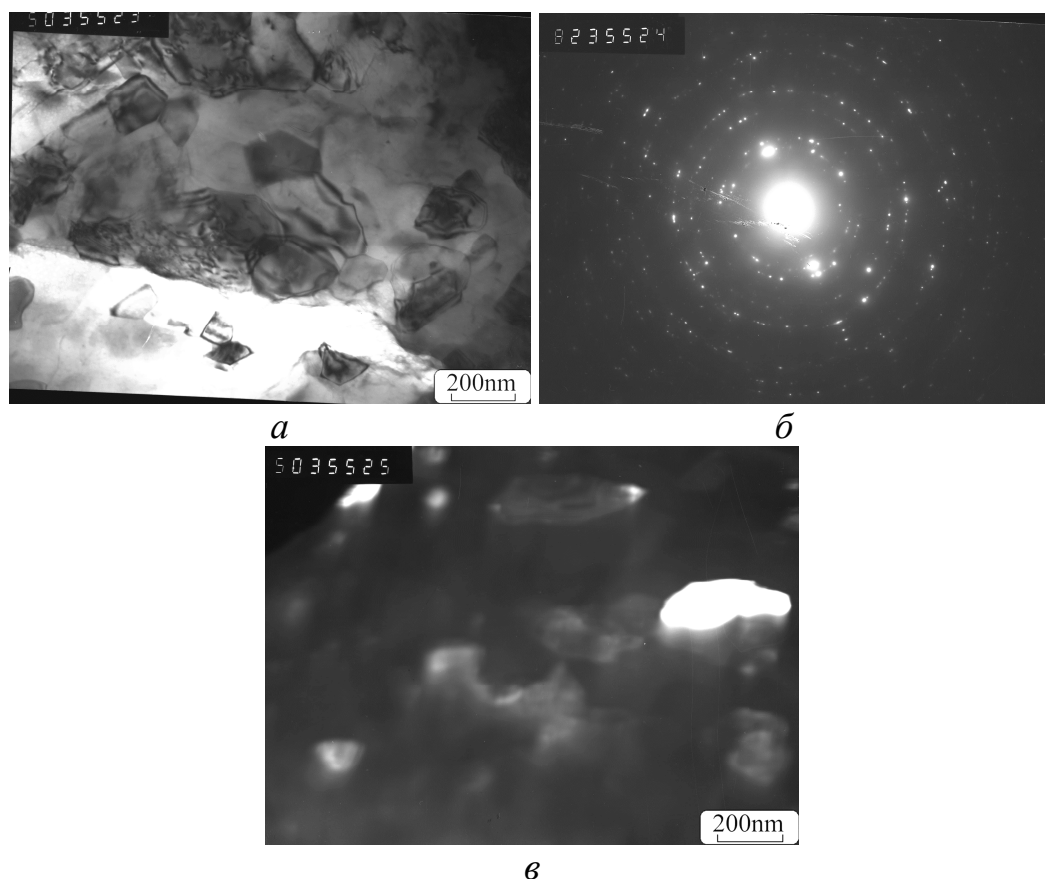


Рис. 1. Отдельные участки с мелким зерном: а – светлое поле; б – электронограмма; в – темное поле

Наиболее подробно совместное влияние прокатки и электроимпульсной обработки исследовано на бинарном Al-Cu сплаве. В качестве репера взят образец, микроструктура которого состоит из зерен α -твердого раствора на основе Al и неравновесной эвтектики ($\alpha + \text{CuAl}_2$),

расположенной по границам зерен. Внутри зерен выявляются дисперсные алюминиды упрочняющей фазы Al_2Cu , размеры которой остаются в интервале 200–400 нм при всех режимах ЭПП.

Рассмотрено влияние плотности тока от 100 до 320 А/мм^2 при прокатке со степенями деформации $1,8 < \epsilon < 3,4$. Методами оптической микроскопии было установлено сильное влияние ЭПП на макроструктуру образцов. В частности, при ЭПП с плотностью тока $j = 100 \text{ А/мм}^2$ и $\epsilon < 2,4$ формируется полосовая структура с высокой твердостью, которая с ростом ϵ заменяется на рекристаллизованную структуру (20 мкм). Повышение плотности тока до $j = 320 \text{ А/мм}^2$ при $\epsilon = 1,8$ приводит к рекристаллизации и формированию равноосной крупнозернистой структуры (35 мкм). ЭПП с плотностью тока $j = 320 \text{ А/мм}^2$ при всех исследованных степенях деформации способствует образованию рекристаллизованной структуры. На размер зерна рекристаллизованной структуры влияет как плотность тока, так и степень деформации. Самая мелкая структура (6 мкм) получена при ЭПП с плотностью тока 320 А/мм^2 и $\epsilon = 3,4$ (рис. 2).

Измерения микротвердости структурных составляющих подтвердили данные металлографии. Процессы рекристаллизации сопровождаются релаксацией напряженного состояния материала, поэтому, несмотря на мелкое зерно, такой материал обладает низкой твердостью 550 МПа, соизмеримой с твердостью исходной недеформированной структуры. Самая высокая твердость была зафиксирована при $\epsilon = 2,4$ и $j = 100 \text{ А/мм}^2$ – 950 МПа.

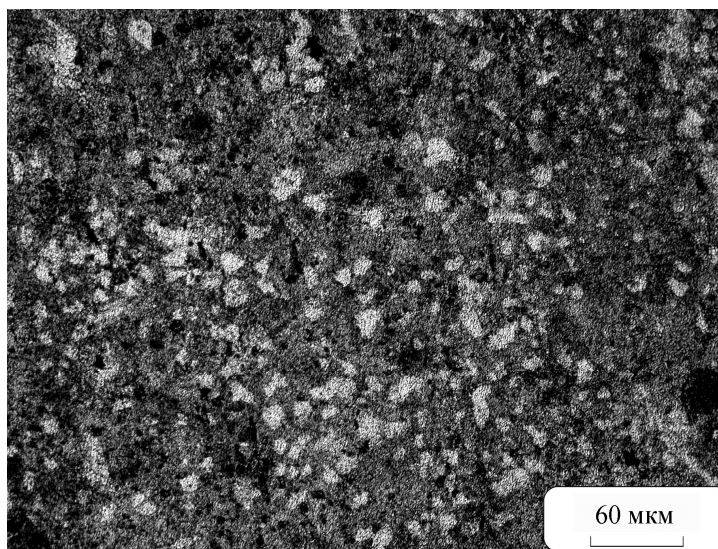


Рис. 2. сплав Al-3,5 %Cu после прокатки и тока (320 А/мм^2); $\epsilon = 3,4$

Таким образом, на примере сплавов двух составов показано, что электроимпульсная обработка при пластической деформации является эффективным способом регулирования масштаба и типа структуры сплавов и может успешно применяться для ее измельчения от субмикронного уровня до нано уровня.