

Особенности ультрамелкозернистого и нанокристаллического состояний в сплаве АМц, полученных при интенсивных воздействиях

Петрова А.Н.^{1,†}, Бродова И.Г.¹, Ширинкина И.Г.¹, Насонов П.А.², Шорохов Е.В.²

¹ Институт физики металлов УрО РАН, Россия, г. Екатеринбург

² Российский Федеральный ядерный центр–ВНИИ технической физики, г. Снежинск

[†] petrovanastya@yahoo.com

The features of ultrafine grained and nanostructured states in AMts alloy processed by intensive impacts

A.N. Petrova¹, I.G. Brodova¹, I.G. Shirinkina¹, P.A. Nasonov², E.V. Shorokhov²

¹Institute of Metal Physics, Ekaterinburg

²Russian Federal Nuclear Center-Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Snezhinsk

Исследованы особенности структурообразования в металлических материалах на основе алюминия при высокоскоростной деформации методом динамического канально-углового прессования (ДКУП). Установлено, что структура со средним размером кристаллитов менее 1 мкм формируется в результате двух механизмов релаксации упругой энергии – фрагментации и динамической рекристаллизации. Легирование алюминиевого твердого раствора снижает подвижность дислокационного ансамбля и затрудняет процесс динамической рекристаллизации в сплаве АМц, увеличивая диапазон условий деформации, при которых структура формируется путем фрагментации, по сравнению с техническим алюминием.

Ключевые слова: технический алюминий, Al-Mn сплав, высокоскоростная деформация, фрагментация, динамическая рекристаллизация.

The features of structure formation in Al-based materials are studied under high strain-rate deformation by dynamic channel angular pressing. A structure with an average crystallite size less than 1 μm is formed by two mechanisms of the elastic energy relaxation, fragmentation and dynamic recrystallization. Alloying of an aluminum solid solution reduces the mobility of dislocation ensemble and hampers the dynamic recrystallization process in the AMts alloy increasing the range of deformation conditions under which the structure is formed by fragmentation as compared to commercially pure aluminum.

Key words: commercially pure aluminum, Al-Mn alloy, high strain-rate deformation, fragmentation, dynamic recrystallization.

1. Введение

Целью настоящей работы являлось изучение деформационного поведения алюминия технической чистоты А7 и малолегированного сплава системы Al-Mn АМц при ударно-волновом нагружении в условиях простого сдвига. Указанные сплавы выбраны в качестве материалов исследования, чтобы установить закономерности структурообразования в материалах на основе алюминия с разной энергией дефекта упаковки, так как алюминий обладает наибольшей среди металлов с г.ц.к. решеткой энергией дефекта упаковки, а легирование марганцем и присутствие технологических примесей снижают значение этой характеристики.

Широко известно, как влияет на структуру материалов обработка методом равно-канального углового

прессования (РКУП), при котором создается деформационное состояние, близкое к простому сдвигу, и реализуются большие степени деформации со скоростью 10^{-2} с^{-1} (мега пластическая деформация - МПД) [1-3]. Благодаря такой обработке можно получить ультрамелкозернистое (УМЗ) состояние материалов, характеризующееся очень мелким размером зерна менее 1 мкм, наличием и преобладанием высокоугловых неравновесных границ зерен. Многочисленные исследования показали, что в зависимости от условий деформации и дальнейшей термической обработки, материалы в таком состоянии проявляют улучшенные физико-механические свойства, например, высокую прочность, низкотемпературную и высокоскоростную сверхпластичность [4, 5].

Также известно влияние пластической деформации в условии ударных волн на структуру и свойства мате-

риалов [6-8]. Так, при высокоскоростном нагружении, вследствие более высоких скоростей деформации, величин развиваемого давления и температуры по сравнению с квазистатической деформацией, скорость перемещения дислокаций значительно выше, увеличивается интенсивность процесса размножения дислокаций, изменяется геометрия скольжения, раньше развивается множественное скольжение. Также известно, что образующиеся при ударно-волновом нагружении в сплавах с г.ц.к. решеткой структуры определяются энергией дефекта упаковки.

В связи с этим, изучение деформационного поведения металлов и сплавов при воздействии высокоскоростной деформации в условиях простого сдвига представляет научный и практический интерес.

2. Материалы и методика эксперимента

В качестве материалов исследования были выбраны алюминий технической чистоты марки А7 и Al-Mn сплав со слабым твердорастворным упрочнением АМц.

Исходный пруток сплава АМц имел субзеренную структуру. Средний размер субзерна составлял 1.5-2 мкм. Внутри субзерен наблюдалась высокая плотность равномерно распределенных выделений Al_6Mn со средним размером 50-70 нм и небольшое количество дислокаций. Границы субзерен, в основном, чистые. В тройных стыках наблюдались единичные алюминиды. Исходный пруток технического алюминия имел ячеистую структуру со средним размером ячейки 2.6 мкм.

В экспериментах использовался метод деформации образцов – динамическое канально-угловое прессование (ДКУП), который был разработан в РФЯЦ ВНИИТФ (г. Снежинск, Россия). Как и в методе РКУП цилиндрический образец продавливается через два пересекающихся под углом $\Phi=90^\circ$ канала (рис. 1), претерпевая деформацию простым сдвигом в зоне пересечения каналов. Продавливание образца осуществляется за счет давления пороховых газов на поршень, таким образом обеспечивается скорость деформации 10^4 - 10^5 с⁻¹. Давление в зоне пересечения каналов составляло 4 ГПа. Начальная скорость движения образца в каналах (V) изменялась в диапазоне от 50 до 300 м/с. Накопленная деформация определяется геометрией оснастки и количеством циклов прессования (N).

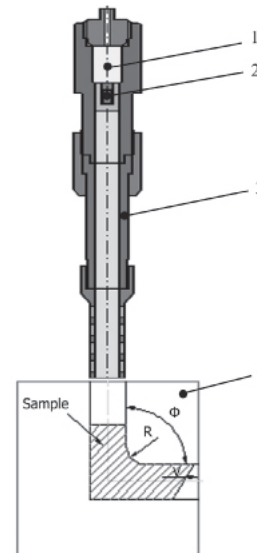


Рис. 1. Схема обработки материалов методом ДКУП. 1-заряд, 2-образец, 3-ствол, 4-матрица.

3. Результаты и их обсуждение

В техническом алюминии А7 один цикл ДКУП при $V=100$ м/с инициирует эволюцию исходной ячеистой структуры (рис. 2а) в УМЗ структуру смешанного типа. Основной объем занимает зеренно-субзеренная сильно деформированная структура, образованная механизмом фрагментации (рис. 2б) в результате развития кристаллографического скольжения решеточных дислокаций и ротационных мод деформации при перемещении частичных дисклиний. Внутри кристаллитов выявляется большая плотность дислокаций. Также наблюдаются области, где прошел динамический возврат. В таких областях кристаллиты имеют четко выявляющиеся границы, они чистые от дислокаций, выявляется полосчатый контраст в приграничной области, что свидетельствует о снижении плотности зернограницных дефектов. Средний размер структурных фрагментов составляет 900 нм. В результате четырех циклов ДКУП при скорости $V=200$ м/с формируется также УМЗ структура, однако можно утверждать, что в основном объеме образца прошли процессы динамической рекристаллизации (рис. 2в). На ПЭМ изображениях в тройных стыках кристаллитов видны мелкие, чистые от дислокаций зерна - зародыши рекристаллизации. Границы кристаллитов имеют в основном высокоугловые разориентировки.

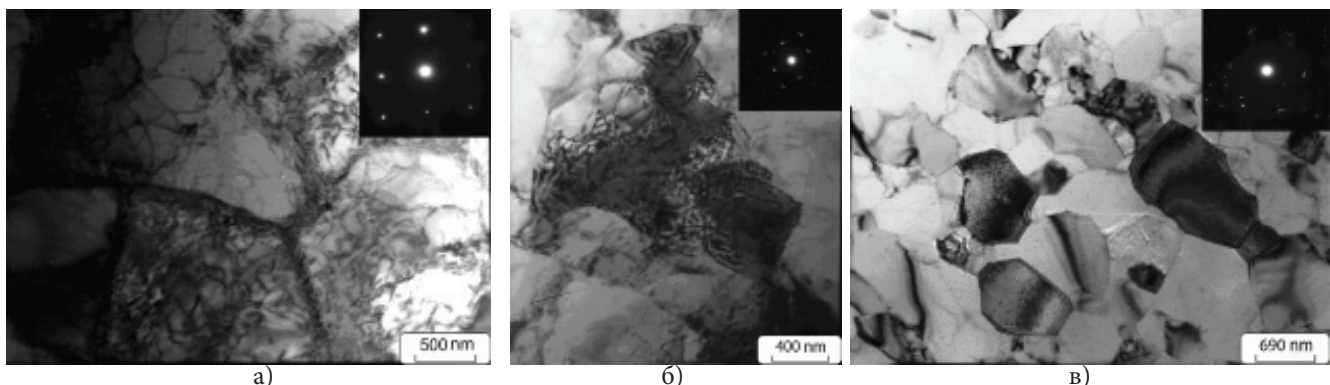


Рис. 2. (а) – ячеистая структура исходного материала А7, (б) – области структуры, образованной механизмом фрагментации ДКУП образца ($V=100$ м/с, $N=1$), (в) – структура динамической рекристаллизации ДКУП образца ($V=200$ м/с, $N=4$).

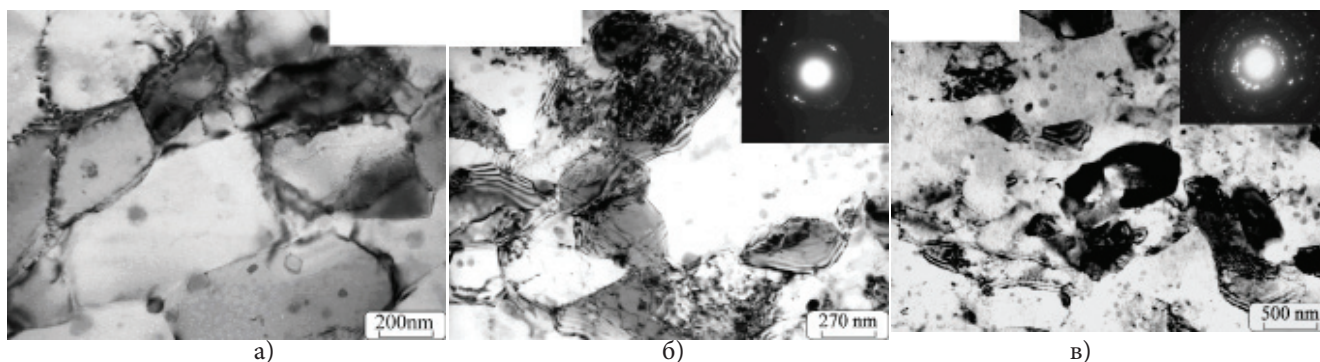


Рис. 3. ПЭМ изображения тонкой структуры сплава АМц после ДКУП: а – $V=50$ м/с, $N=4$, б – $V=150$ м/с, $N=1$, в – $V=300$ м/с, $N=1$.

Средний размер кристаллитов, полученный с алюминии методом ДКУП при $N=4$ и $V=200$ м/с, составляет 700 нм.

Структурные изменения в техническом алюминии приводят к изменению механических свойств (табл. 1). Так, твердость материала после ДКУП в 2.5 раза превышает твердость исходного состояния. За счет формирования более мелкой структуры и преобладанию высокоугловых разориентировок границ кристаллитов технический алюминий после четырехкратного прессования при скорости $V=200$ м/с с рекристаллизованной структурой имеет на 13 % большую твердость чем УМЗ материал со смешанной структурой.

Таблица 1.

Твердость по Бринеллю технического алюминия А7 в различных состояниях.

Состояние	НВ
Исходный КК	15,2
После ДКУП, $N=1$, $V=100$ м/с (фрагментация и динамический возврат)	33,8
После ДКУП, $N=4$, $V=200$ м/с (динамическая рекристаллизация)	38,3

В сплаве АМц, имеющем меньшую энергию дефекта упаковки, метод ПЭМ показал, что под воздействием высокоскоростной деформации в зависимости от режимов деформации, формируется ряд структур, характеризующихся разным уровнем дефектности материала и отличающихся долей мало- и высокоугловых границ. По сравнению с исходным субзерненным состоянием, в диа-

пазоне условий $V=50-80$ м/с, $N=2-4$ происходят существенные изменения структуры. В структуре наблюдаются субзерна с малоугловыми границами, образованными при фрагментации (рис. 3а). После одного прохода при большей скорости $V=150$ м/с фрагментация исходной субструктуры приводит к формированию более разориентированной УМЗ структуры, внутри фрагментов которой выявляется высокая плотность дислокаций (рис. 3б). Увеличение скорости до 300 м/с при одном проходе образца способствует развитию процесса фрагментации за счет ротационных мод деформации, что проявляется в формировании УМЗ структуры (рис. 3в). При данных условиях деформации $V=150$ м/с, $N=1$, 4 и $V=300$ м/с $N=1$ в материале формируется структура, в которой сосуществуют большеугловые и малоугловые границы. На рис. 4 представлена рекристаллизованная структура образца после четырехкратного динамического прессования при скорости $V=300$ м/с. Видно, что внутри кристаллитов резко сократилось количество решеточных дислокаций. По данным EBSD, доля большеугловых границ зерен составляет 63% при среднем угле разориентировки 20° . Средний размер кристаллитов равен 570 нм. Можно считать, что конечная структура сплава АМц образована в результате прохождения релаксационных процессов, таких как динамический возврат и динамическая рекристаллизация. Данный вывод подтверждается близким к бимодальному характером гистограмм распределения кристаллитов по размеру, что характерно для структур после динамической рекристаллизации.

4. Заключение

Суммируя полученные данные об эволюции структуры исследованных материалов в процессе ДКУП, можно сказать, что динамическое прессование при малых скоростях и малом числе проходов приводит к формированию слабо разориентированных дислокационных структур, а с ростом скорости и накопленной деформации структурообразование осуществляется при конкуренции двух процессов: фрагментации и динамического возврата или динамической рекристаллизации. В техническом алюминии, обладающим более высокой подвижностью дислокационного ансамбля, признаки динамического возврата и рекристаллизации наблюдаются уже при малой интенсивности деформации ($V=100$ м/с, $N=1$), и уже после второго цикла прессования ($V=200$ м/с) структура становится рекристаллизованной. В более легированном сплаве АМц, за счет снижения

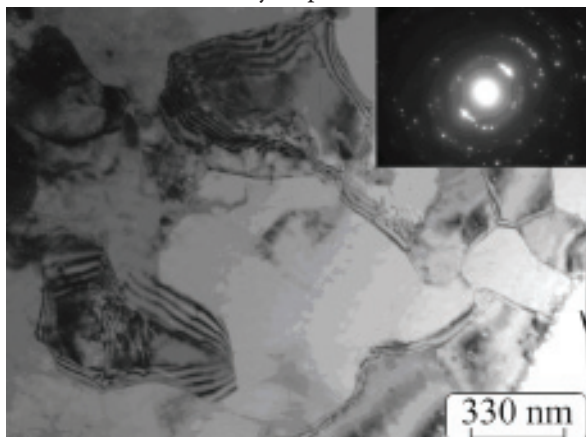


Рис. 4. ПЭМ изображения тонкой структуры сплава АМц после ДКУП при $V=300$ м/с, $N=4$.

энергии дефекта упаковки, процессы динамического возврата наступают при большей интенсивности деформирования (N , V). Тем самым, увеличивается диапазон условий деформации, при которых основным механизмом структурообразования является фрагментация, что позволяет получить меньший размер кристаллитов в этом материале.

Электронно-микроскопические исследования выполнены в отделе электронной микроскопии ЦКП ИФМ УрО РАН «Испытательный центр нанотехнологий и перспективных материалов» и в ЦКП «Диагностика структуры и свойств наноматериалов» НИУ «БелГУ» в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (Государственное соглашение № 14.А18.21.0103 по обобщенной теме «Современные методы исследования специальных сталей и сплавов»).

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке проекта ориентированных фундаментальных исследований УрО РАН №12-02-012 ЯЦ и проекта РФФИ №11-03-00047.

Литература

1. Валиев Р.З., Александров И.В. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства. М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. 398 с.
2. Langdon T. G. The principles of grain refinement in equal-channel angular pressing. Mater. Sci. Eng., 2007, V. 462 A, P. 3-11.
3. Iwahashi Y., Furukawa M., Horita Z. et. al. Microstructural characteristics of ultrafine-grained aluminum produced using equal-channel angular pressing. Met. Mat. Trans., 1998, V. A29, P. 2245-2252.
4. Добаткин С.В. Механические свойства ультрамелкозернистых алюминиевых сплавов и возможности их использования. Технология легких сплавов, 2011, №3, С. 5-17.
5. Маркушев М.В., Мурашкин М.Ю. Механические свойства субмикроструктурных, алюминиевых сплавов после интенсивной пластической деформации угловым прессованием. Физика металлов и металловедение, 2000, Т. 90, №5, С. 92-101.
6. Эпштейн Г.Н., Кайбышев О.А. Высокоскоростная деформация и структура металлов. М.: Металлургия, 1971. 200 с.
7. Мурр Л.Е. Микроструктура и механические свойства металлов и сплавов после нагружения ударными волнами. Ударные волны и явления высокоскоростной деформации металлов. Под редакцией Мейерса М.А., Мурра Л.Е.: Пер. с англ. М.: Металлургия, 1984. 512 с.
8. Мейерс М.Л., Мурр Л.Е. Ударные волны и явления высокоскоростной деформации металлов. М.: Металлургия, 1984. С. 121-151.