УДК 538.91:548.4

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ AL - MG - LI

©Наталья Владимировна Землякова, Евгений Николаевич Разов, Александр Сергеевич Пупынин
Институт проблем машиностроения РАН, Нижний Новгород, Россия
gf.sarafanov@yandex.ru

Аннотация. *Проведено исследование структуры и фазового состава алюминиевого сплава 1421 после динамического сжатия по методу Кольского - Гопкинсона. Показано, что в результате испытаний в сплаве образуются микрополосы сдвига, расстояние между которыми в сплаве с крупным зерном (15 μm) составляет 2 μm и в сплаве с мелким зерном (1,8 μm) - 0,5 μm. При этом между полосами сдвига возникают дислокационные малоугловые границы, формируя в итоге разориентированную дислокационную ячеистую структуру (субзеренную).*

Ключевые слова*: алюминиевый сплав, ультрамелкозернистые материалы, высокоскоростная деформация сжатием, субзеренная структура.*

THE STUDY OF THE INFLUENCE OF THERMOMECHANICAL PROCESSING ON THE STRUCTURE AND PHASE COMPOSITION ALUMINUM ALLOY SYSTEM AL - MG – LI

©N.V. Zemlyakova, E.N. Razov, A.S. Pupinin
MERI RAS, Nizhny Novgorod, Russia
gf.sarafanov@yandex.ru

Abstract. *A study of the structure and phase composition of aluminum alloy 1421 after dynamic compression according to the method of the Kolsky - Hopkinson. It is shown that the tests in the alloy formed micro band, the distance between which in the alloy with large grains (15 μm) is 2 μm and in the alloy with a fine grain (1,8 μm) - 0.5 μm. Thus, between shear bands occur dislocation low-angle jumpers, forming eventually misoriented dislocation cells structures (subgrained).*

Key words: *aluminum alloy, fine-grained materials, high-speed deformation of compressed, subgrained structure.*

Введение

Для снижения веса конструкции в аэрокосмической отрасли используют сплавы с литием. Отечественный деформируемый сплав 1421, системы Al - Mg - Li -Zr, отличается возможностью повышения прочности за счет двух упрочняющих частиц Al_3Li и Al_3Sc, имеет высокий модуль упругости при пониженной плотности, однако, отличается пониженной технологической пластичностью. В последнее время для повышения прочностных и пластических свойств материалов используют термомеханическую обработку на основе методов интенсивной пластической деформации (ИПД) (severe plastic deformation), к которым относятся, например, метод равноканального углового прессования (РКУП) и динамическое высокоскоростное импульсно - волновое деформирование при сжатии [1-8]. Результат ИПД

имеет ряд характерных особенностей: образование микрополосовой дислокационной субструктуры, состоящей из фрагментов с высокоугловыми границами; отсутствие деформационного упрочнения; динамическая рекристаллизация [9]. Термомеханическая обработка проходит при разной скорости пластической деформации и температуре нагрева, при этом важно уметь прогнозировать фазовые изменения микроструктуры сплава.

Целью настоящей работы является исследование структуры и фазового состава алюминиевого сплава 1421 после динамического сжатия по методу Кольского – Гопкинсона, используя образцы, подвергнутые РКУП и исходном – крупнокристаллическом состоянии.

1. Методика эксперимента и материалы

Исследование проводили на прутке из крупнозернистого (КЗ) алюминиевого сплава 1421 диаметром 20 мм. Ультрамелкозернистые (УМЗ) образцы получали из заготовки с крупным зерном 15 мкм после проведения интенсивной пластической деформации методом равноканального углового прессования (РКУП) по маршруту Вс: 8 проходов при температуре 420°С и далее 4 прохода при 350°С. Анализ фазовых превращений проводили методом дифференциально - сканирующей калориметрии на образцах до и после динамического деформирования на установке *NETZSCH DSC 204 F1 Phoenix*.

Для образцов в состоянии поставки, после закалки и после динамического деформирования были получены термограммы изменения теплового потока от температуры нагрева. Перед нагревом в калориметре образцы запаивались в тигли, непрерывный нагрев которых проводился в атмосфере аргона до температуры 773ºК со скоростью 40К/мин при постоянном давлении. При нагреве образцов в печи калориметра в сплаве происходил распад твердого раствора. Изменение фазового состава сплава отражалось на появлении тепловых эффектов на ДСК кривой в зависимости от температуры нагрева. Площадь под пиками на ДСК кривых представляет выделяемую при структурно - фазовых превращениях энергию или энтальпию. По результатам калориметрических исследований определяли энтальпию до и после скоростного деформирования.

Динамические испытания образцов на сжатие проводили при комнатной температуре по традиционной методике Кольского с использованием разрезного стержня Гопкинсона (РСГ) [9,10]. Установка, реализующая метод РСГ, состоит из газовой пушки калибра 10 мм, мерных стержней диаметром 10 мм и комплекса измерительно-регистрирующей аппаратуры. Эксперименты проводились при постоянной скорости ударника 14 м/с, скорость деформации образцов составила $3 \div 6\ 10^3\ с^{-1}$.

Исследование микроструктуры проводили металлографическим методом на оптическом микроскопе *Neophot* - 32, при увеличении х1000 (х 2000) и сканирующем электронном микроскопе *TESCAN VEGA* II. Энергодисперсионный микрорентгеноспектральный анализ образцов сплава проводился на приставке *Oxford Instruments INCA Energy* 250. Фазовый состав сплава определяли по результатам количественного микроанализа и по профилю распределения химических элементов.

2. Микроструктурные исследования

Металлографический анализ микроструктуры КЗ и УМЗ образцов до и после динамической деформации показал изменения формы выделений избыточных фаз (рис. 1).

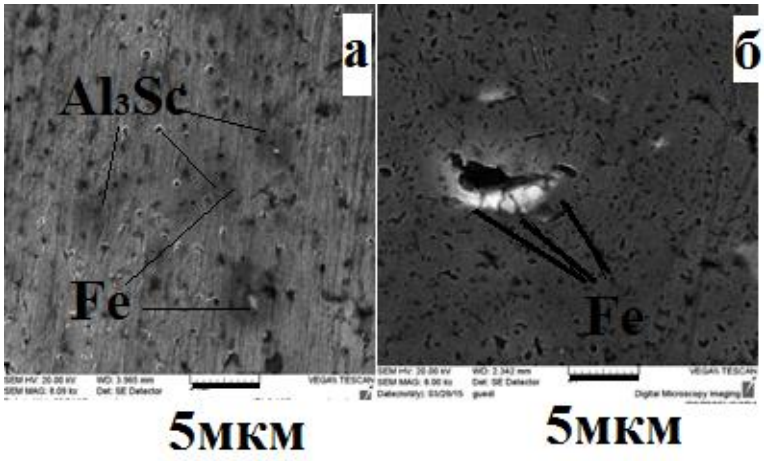

Рис.1. СЭМ микроструктура алюминиевого сплава 1421 после динамического сжатия в УМЗ (а) и КЗ (б) в сплаве с частицами фаз железа

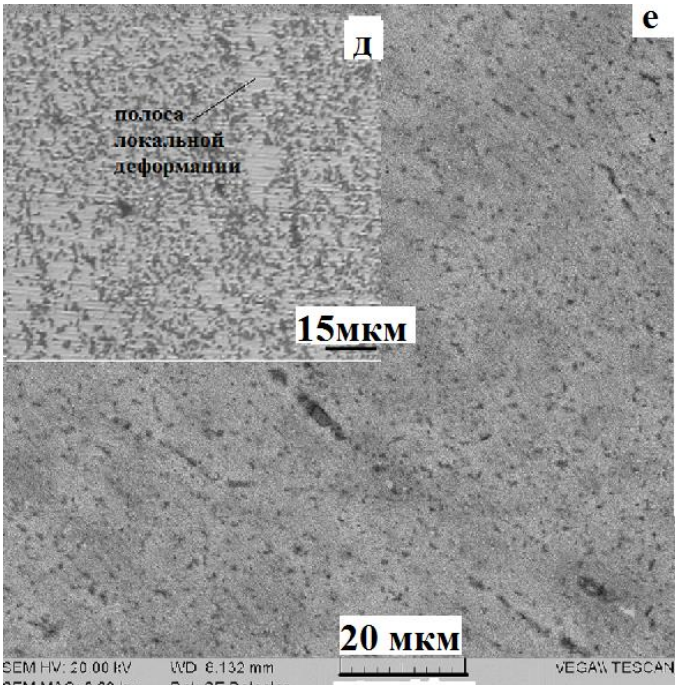

Рис. 2. Микроструктура сплава 1421 после РКУП обработки (д) и последующего динамического сжатия (е)

Микроструктурный анализ показал, что при динамическом сжатии крупнозернистого сплава образовалась микрополосовая структура (рис. 3з). Фазовые изменения коснулись частичного механического растворения частиц S - фазы, округлые выделения которой уменьшились в размерах от диаметра 0,5 мкм до 0,2 мкм и дополнительно появились выделения метастабильной S' - фазы. Таким образом, на месте строчек из S - фазы образовались округлые ее выделения, расположенные по границам диаметром 2 мкм.

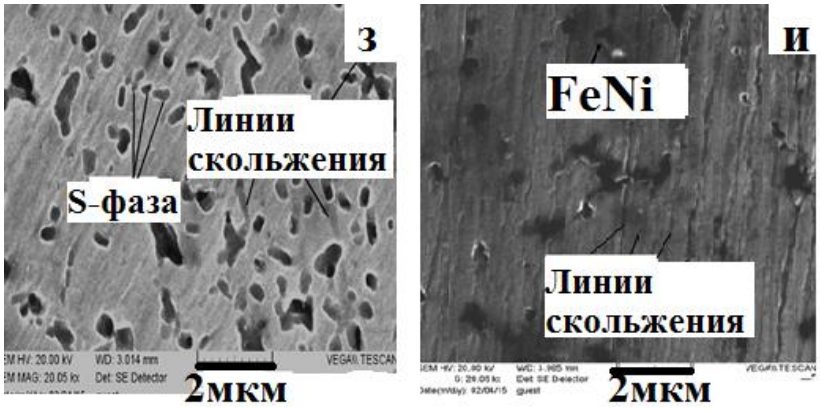

Рис. 3. Полосы (линии) скольжения на растровом изображении микроструктуры сплава 1421 после динамического сжатия в КЗ (з) и УМЗ (и) сплава

Изменения в структурно - фазовом состоянии крупнозернистого сплава могут происходить в результате диффузионной пластической деформации, которая сопутствует скольжению. Теория процесса была описана Курдюмовым В.Г. и состоит в следующем: при деформации в микроструктуре сплава создается направленное перемещение (диффузия) атомов примеси в деформируемых зернах в направлении градиента напряжений. Известно, что явление диффузионной пластичности, так же как и скольжение, может приводить к остаточным изменениям размеров и формы зерен, которые возникают в результате смещения дислокации. Механизм диффузионной пластичности наиболее сильно проявляется в периферийных слоях зерен и по границам блоков мозаики.

Микроструктура после динамического деформирования УМЗ сплава представлена (рис.2е). Данные калориметрических исследований в нашей работе показали, что после динамического сжатия изменяется распад твердого раствора, поэтому, к образованию полосовой структуры, добавляются изменения в фазовом составе.

Таким образом, в результате проведенного исследования получено, что при динамическом деформировании как в УМЗ, так и КЗ сплава образуется микрополосовая фрагментированная структура [11]. Расстояние между полосами характеризует измельчение структурных составляющих, однако при одной деформационной скорости в КЗ материале в результате локальной диффузионной пластической деформации образовались зерна, в УМЗ сплаве образуются только фрагментация в полосах деформации.

Благодаря динамическому сжатию, в крупнозернистом сплаве происходит выделение метастабильной S фазы, а в ультрамелкозернистом сплаве на месте растворения S´ фазы образуются зоны содержащие фазуAl_3Sc. Таким образом, в УМЗ и КЗ сплаве 1421 при динамическом деформировании происходит более равномерное распределение избыточных фаз.

Выводы

После динамического сжатия в сплаве 1421 с зерном 15 мкм и 1,8 мкм удается получить более равномерное распределение фазовых составляющих, одновременно образуются полосы скольжения, расстояние между которыми составляет 2 мкм в крупнозернистом сплаве и 0,5 мкм в ультрамелкозернистом сплаве. При этом внутри полос возникают дислокационные малоугловые границы [11], т.е. динамическое деформирование способствует измельчению (фрагментации) материала со структурой до и после РКУП обработки.

После динамического сжатия изменяется схема распада твердого раствора сплава: в

крупнозернистом сплаве образуется выделения метастабильной *S* фазы, а в ультрамелкозернистом сплаве на месте растворения *S′* фазы образуются зоны содержащие фазу Al_3Sc.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 15-03-06372).

Список литературы

1. Валиев Р.З., Александров И. В. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства. - М.: «Академкнига», - 2007. - 398 с.
2. Валиев Р.З., Александров И.В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. - М.: Логос. 2000. 272 с.
3. Исламгалиев Р.К. Высокопрочное состояние ультрамелкозернистых алюминиевых сплавов. // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. - 1997. - №7. - С.52 - 57.
4. Могучева, А.А., Кайбышев Р.О. Структура и свойства алюминиевого сплава 1421 после РКУ прессования и изотермической прокатки. // Физика металлов и металловедение. - 2008. - Т.106. - №4. - С. 1 - 10.
5. Sayers C.M. Ultrasonic velocities in anisotropic polycrystalline aggregates // Appl. Phys. 1982. V. 15. P. 2157–2167.
6. Мещеряков Ю.И. и др. Влияние размера зерна на макроскопический отклик алюминия на ударное сжатие. // Прикладная механика и техническая физика. 2007. - Т.48. - №6. - С. 135 - 146.
7. Глезер А.М., Метлов Л.С. Физика мегапластической (интенсивной) деформации твердых тел // Физика твердого тела, 2010. – Т. 52. - вып. 6. – С. 1090 – 1097.
8. Valiev R.Z., Alexandrov I.V., Lowe T.C, Zhu Y.T, J. Mater. Res. **17**, 5 (2002).
9. Kolsky H. An investigation of the mechanical properties of material at very high rates of loading // Proc. Phys. Soc. (London), Vol. 62B. - 1949. pp.676-700.
10. Брагов А.М., Родионов С.Н. Способ возбуждения в твердом теле импульса сжатия сложной формы // Письма ЖТФ. - 2004.- Т.30. - В.21. - С.10 - 14.
11. Сарафанов Г.Ф., Перевезенцев В.Н., Рыбин В.В. Основы кинетической теории формирования разориентированных структур при пластической деформации металлов. - Нижний Новгород: Изд-во «Литера», 2011. - 358с.

Дата поступления статьи: 4 декабря 2016 года.