

ВЛИЯНИЕ ХРОМА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СПЛАВА AL-CU-ER-ZR

Поздняков А.В. *, Барков Р.Ю., Главатских М.В. **pozdnikov@misis.ru*
НИТУ МИСИС, Россия, Москва

Цель работы и объекты исследования: Сплавы систем Al-Cu-PЗМ (где PЗМ – это редкоземельные металлы) с атомным соотношением Cu/PЗМ=4 перспективны для создания новых высокотехнологичных и жаропрочных материалов, поскольку имеют узкий интервал кристаллизации за счет высокой температуры солидуса. Введение Zr позволяет существенно повысить механические свойства и стойкость к рекристаллизации тройных сплавов за счет $L1_2$ - Al_3 (Zr,PЗМ) дисперсоидов, образующихся при гомогенизации слитков. Хром, являясь весьма распространенным легирующим элементом в алюминиевых сплавах, обеспечивает дополнительное упрочнение в сочетании с другими PЗМ. Целью настоящей работы является определение влияния 0,3%Cr на микроструктуру, фазовый состав и механические свойства сплава Al-4,3Cu-2,8Er-0,3Zr (AlCuErZrCr).

Результаты: На рисунке 1 представлена зеренная структура исследуемого сплава и сплава сравнения. Размер зерна в слитке сплава AlCuErZr (сплав сравнения без Cr) составляет около 250 мкм. Легирование хромом в совокупности с имеющимися в сплаве эрбием и цирконием приводит к существенному модифицированию и практически полному устранению дендритной структуры. В сплаве AlCuErZrCr размер зерна (рисунок 1б) соответствует размеру дендритной ячейки (рисунок 1в) и составляет примерно 40 мкм. Высокую совместную модифицирующую способность можно объяснить образованием интерметаллидов в слитке, являющихся, по всей видимости, центрами зарождения первичного алюминия. На рисунке 1в отмечены достаточно компактные оgranенные кристаллы размером 2-10 мкм.

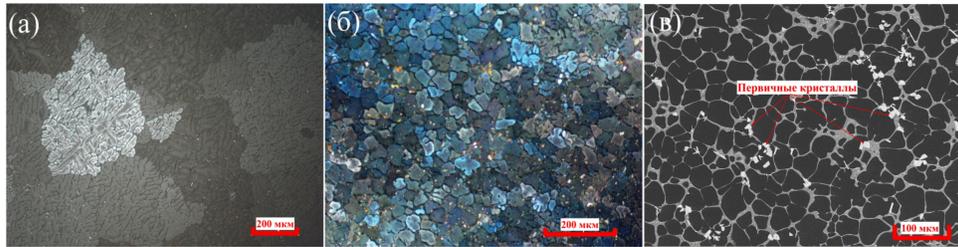


Рисунок 1. Микроструктура сплавов AlCuErZr (а) и AlCuErZrCr (б, в) в литом состоянии (а, б – зеренная структура (ОМ), в – СЭМ)

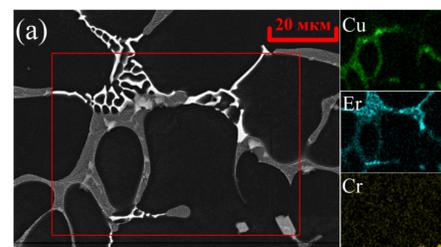


Рисунок 2. Микроструктура (СЭМ) слитка сплава AlCuErZrCr (на рисунке а представлено распределение элементов между фазами в выделенном прямоугольнике)

Рисунок 2 иллюстрирует микроструктуру и фазовый состав исследуемого сплава AlCuErZrCr. Помимо уже представленных оgranенных компактных кристаллов в структуре присутствуют алюминиевый твердый раствор (Al), дисперсная эвтектика с фазой обогащенной медью и эрбием и более грубые частицы содержащие только эрбий. Согласно рентгенофазовому анализу частицы фаз соответствуют соединениям Al_8Cu_4Er в составе дисперсной эвтектики и Al_3Er . Оgranенные компактные кристаллы содержат в своем составе Cu, Cr, Er помимо алюминия в количестве 17-20,5масс.%, 10масс.%, 13-17масс.% и остальное Al соответственно. После пересчета в атомные доли формулу фазы в первом приближении можно записать как $Al_{75-80}Cu_{10-12}Er_{3-4}Cr_7$. При этом сведений о фазе нет в рентгеновской базе данных, а на рентгенограмме сплава AlCuErZrCr нет новых пиков в сравнение со сплавом без хрома. В данном случае, пики от новой фазы вероятно перекрываются основными пиками других идентифицированных фаз. В случае перекрытия пиками от алюминия можно говорить о близости параметра решетки новой фазы и (Al), что подтверждает существенно меньшее зерно в сплаве AlCuErZrCr.

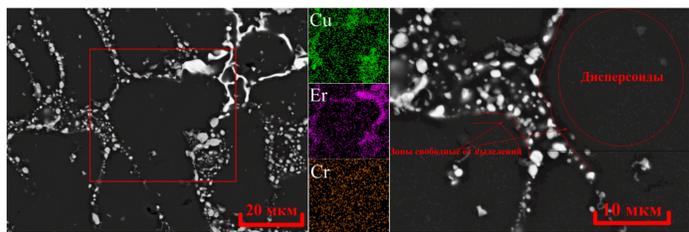


Рисунок 3. Микроструктуры (СЭМ) сплава AlCuErZrCr после гомогенизации при 600°C в течение 3 часов и закалки и распределение элементов между фазами в выделенном прямоугольнике

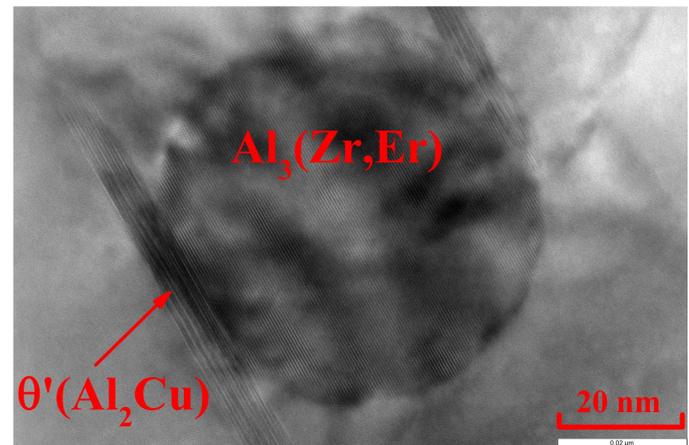


Рисунок 4. Микроструктура (ПЭМ) после гомогенизации при 600°C в течение 3 часов, закалки и старения при 210°C в течение 3 часов

На рисунке 5 представлены графики зависимости твердости от времени отжига при низких температурах и от температуры одночасового отжига. В прокатанном состоянии твердость 1 мм листа сплава AlCuErZrCr составила 106 HV. Разупрочнение при низких температурах в сплаве с хромом протекает существенно медленнее чем в сплаве близкого состава без него. При повышении температуры отжига до 350°C твердость сплавов существенно снижается и выравнивается. Согласно микроструктурным исследованиям в обоих сплавах при этом наблюдается частично рекристаллизованная структура (см. вставки микроструктур на рисунке 6б). Горячая прокатка сплава AlCuErZrCr при температуре 440°C согласно термодинамическим расчетам должна протекать в фазовой области ((Al)+ Al_3 Zr+ Al_7 Cr). Можно предположить, что в процессе горячей прокатки произойдет распад пересыщенного хромом раствора с образованием дисперсоидов фазы Al_7 Cr. Однако анализ тонкой структуры сплава AlCuErZrCr в отожженном после прокатки состоянии показал наличие только дисперсоидов $L1_2$ - Al_3 (Zr,Er). Отличия в твердости сплавов при отжиге до 300°C возможно объяснить либо влиянием растворенных атомов хрома, либо образованием кластеров хром-содержащих частиц, которые не удалось идентифицировать в ПЭМ. Для сравнения легирование Mn сплава AlCuErZr приводит к существенному упрочнению за счет образования дисперсоидов фазы $Al_{20}Cu_2Mn_3$.

Выводы:

Легирование хромом сплава Al-Cu-Er-Zr приводит к существенному модифицированию и практически полному устранению дендритной структуры. Средний размер зерна соответствует размеру дендритной ячейки и составляет 40 мкм. Высокую модифицирующую способность можно объяснить образованием интерметаллидов, являющихся, по всей видимости, центрами зарождения первичного алюминия, которые идентифицированы как $Al_{75-80}Cu_{10-12}Er_{3-4}Cr_7$. После закалки и старения упрочнение в сплаве достигается за счет сферических частицы $L1_2$ - Al_3 (Zr,Er) средним диаметром 40 нм и дискообразных θ' (Al_2Cu) диаметром до 100 нм и толщиной до 5 нм. Частиц содержащих хром в матрице не найдено. Горячая прокатка сплава AlCuErZrCr при температуре 440°C согласно термодинамическим расчетам должна протекать в фазовой области ((Al)+ Al_3 Zr+ Al_7 Cr). Однако анализ тонкой структуры в отожженном после прокатки состоянии показал наличие только дисперсоидов $L1_2$ - Al_3 (Zr,Er). Отличия в твердости сплавов при отжиге до 300°C возможно объяснить либо влиянием растворенных атомов хрома, либо образованием кластеров хром-содержащих частиц, которые не удалось обнаружить.

В литом состоянии содержание меди в растворе составило 1,1%, также определено примерно 0,2%Er и по 0,4% Zr и Cr. В процессе гомогенизации происходит растворение неравновесного избытка фаз кристаллизационного происхождения, содержащих медь. К данным фазам могут относиться Al_2Cu и/или AlCu согласно результатам предыдущих исследований на сплавах близкого состава. Количество этих фаз невелико, а пики на рентгенограммах

перекрываются пиками от основных фаз. В результате гомогенизации после 3 часов происходит стабилизация содержания меди на уровне 1,8%, а также фрагментация и сфероидизация равновесного избытка фаз кристаллизационного происхождения (рисунок 3). В литом состоянии толщина фазы Al_8Cu_4Er в эвтектике составляла менее 200 нм, после гомогенизации частицы сфероидизировались до диаметра примерно в 1 мкм (рисунок 3). Параллельно с гомогенизацией протекает гетерогенизация. Пересыщенный твердый раствор по эрбию, цирконию и хром претерпевает распад. Согласно термодинамическим расчетам политермического разреза Al-1,8Cu-0,4Zr-(0-1)Cr при 600°C в равновесии с (Al) должна присутствовать фаза Al_3Zr . Так же возможно присутствие фазы Al_7Cr , поскольку сплав при 600°C находится на границе двух- и трехфазных областей. На правом рисунке 3 при большом увеличении видны зоны свободные от выделений и выделения внутри (Al). На рисунке 4 представлена тонкая структура сплава после закалки и старения. В матрице алюминиевого твердого раствора точечным анализом идентифицировано два типа выделений. Первые – сферические частицы $L1_2$ - Al_3 (Zr,Er) средним диаметром 40 нм и дискообразные θ' (Al_2Cu) диаметром до 100 нм и толщиной до 5 нм. При этом выделения фазы θ' (Al_2Cu) образованы в основном на границе (Al) с частицами $L1_2$ - Al_3 (Zr,Er). Частиц содержащих хром в матрице не найдено.

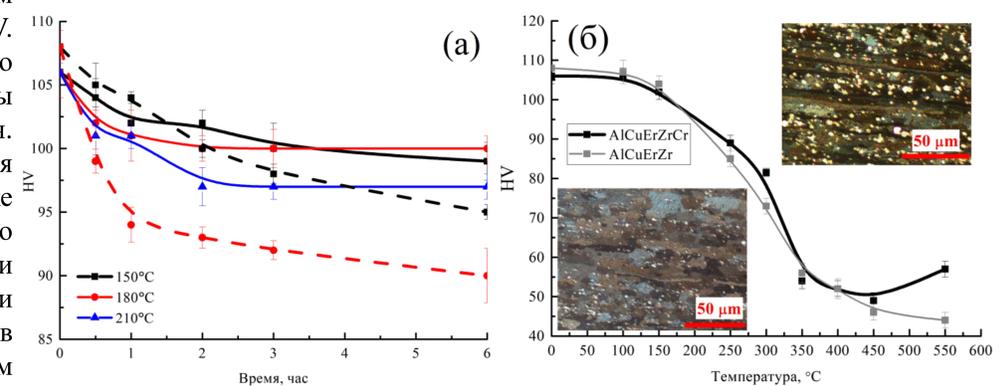


Рисунок 5. Эволюция твердости в процессе отжига листов сплавов AlCuErZrCr и AlCuErZr: а – временные зависимости, б – температурные зависимости после одночасового отжига, на рисунке б – вставки зеренной структуры после отжига при 350°C (на рисунке а – сплошные линии для сплава AlCuErZrCr, пунктирные - для сплава AlCuErZr)