

МАТЕРИАЛЫ И ПОКРЫТИЯ

УДК 548.735:669.715

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА БЫСТРОЗАТВЕРДЕВШЕЙ ФОЛЬГИ СПЛАВА АЛ4, ЛЕГИРОВАННОЙ НИКЕЛЕМ И ХРОМОМ

П.А. СИВЦОВА, д-р физ.-мат. наук, проф. В.Г. ШЕПЕЛЕВИЧ
(Белорусский государственный университет, Минск)

Изложены результаты рентгеноструктурного анализа и исследования микротвердости быстро-затвердевшей фольги сплавов АЛ4 - 0,30 ат. % Cr - 0,90 ат. % Ni, АЛ4 - 0,15 ат. % Cr - 0,45 ат. % Ni и АЛ4 - 0,90 ат. % Cr. При отжиге в определенном температурном интервале сплавы испытывают увеличение микротвердости, причем для первых двух составов упрочнение происходит двукратно, а для третьего - однократно. Микротвердость при отжиге может увеличиваться в два раза и более.

Введение. Перспективным материалом для гранулированных сплавов являются алюминиевые сплавы, легированные переходными металлами. Никель и хром не являются традиционными присадками к алюминию, в связи с чем их влияние на свойства алюминиевых сплавов исследовано не так полно, как, например, меди, магния, кремния или лития. Вопрос же взаимного влияния никеля и хрома в твердом растворе на основе алюминия практически не рассматривался в литературе [1], поведение системы Al - Ni - Cr в области, богатой алюминием, исследовано слабо, еще хуже известны свойства сплавов, модифицированных термической обработкой или полученных методами сверхбыстрой закалки из расплава [2, 3]. Растворимость обоих элементов в алюминии мала: менее 0,30 масс. % Cr и менее 0,006 масс. % Ni [1]. Поэтому при обычной кристаллизации алюминиевых сплавов, легированных никелем и хромом, наблюдается интенсивное образование включений интерметаллических фаз. Применение методов сверхбыстрого охлаждения позволяет предотвратить этот процесс и получить пересыщенный твердый раствор, находящийся в неравновесном состоянии. При повышении температуры такие сплавы становятся нестабильными и изменяют свои механические свойства. Нами представлены результаты исследования структуры и механических свойств быстрозатвердевшей фольги сплава АЛ4 с присадками Ni и Cr, а также рассмотрена динамика изменений ее микротвердости при отжиге.

Материалы и методы исследования. Литейный алюминиевый сплав АЛ4 (0,17...0,3 масс. % Mg, 0,2...0,5 масс. % Mn, 8... 10,5 масс. % Si, Al - остальное) был выбран нами в качестве основы для изучаемых сплавов из-за широкого применения в промышленности и эвтектической структуры.

Сплав номинального состава АЛ4 - 0,30 ат. % Cr - 0,90 ат. % Ni (далее - все проценты - атомные) был получен сплавлением компонентов в муфельной печи. Данный сплав и АЛ4 использовались для синтеза сплава АЛ4 - 0,15 ат. % Cr - 0,45 ат. % Ni также в муфельной печи. Помимо этого было произведено некоторое количество сплава АЛ4, легированного только хромом в концентрации 0,90 ат. %.

Для получения фольги сверхбыстрой закалкой из жидкой фазы капля расплава массой примерно 0,2 г инжигировалась на внутреннюю полированную поверхность медного цилиндра диаметром 20 см, частота вращения которого составляла 25 об/с. Максимальная длина полученных фольг достигает 5 см, их ширина - 10 мм. Толщина исследуемой фольги находилась в пределах 50...100 мкм. Скорость охлаждения достигала 10^6 К/с. Сторона, прилегающая к кристаллизатору, имеет зеркальную, а противоположная сторона - бугристую структуру.

Поверхностная структура образцов изучалась посредством растрового электронного микроскопа LEO 1455 VP. Рентгенографические исследования проводились на дифрактометре ДРОН-3М в геометрии Брега - Брентано в монохроматизированном медном излучении. Текстура фольг изучалась методом обратных полюсных фигур. Полюсная плотность дифракционных линий p рассчитывалась по методу Харриса. Физическое уширение дифракционной линии (420) твердого раствора на основе алюминия и относительные микродеформации кристаллической решетки рассчитывались методом аппроксимации профиля линии. Микротвердость фольг измерялась с помощью микротвердомера ПМТ-3. Прилагаемая нагрузка составляла 20 г. Изохронный отжиг исследуемых фольг проводился в температурном диапазоне 20...530 °С с шагом в 30 °С на протяжении 20 мин при каждой температуре. Изотермический отжиг для исследования микротвердости проводился при температурах 100, 200, 300 и 400 °С в течение нескольких часов.

Результаты и обсуждение. Электронно-микроскопические исследования поверхности показывают, что поверхность фольги состоит из малых ячеек субмикронного размера (рис. 1). Визуально структу-

ра поверхности однородная, без включений, лишь рентгеноспектральный анализ показывает наличие дисперсоидов кремния. Однородное распределение никеля и хрома позволяет утверждать, что легирующие элементы в основном находятся в твердом растворе.

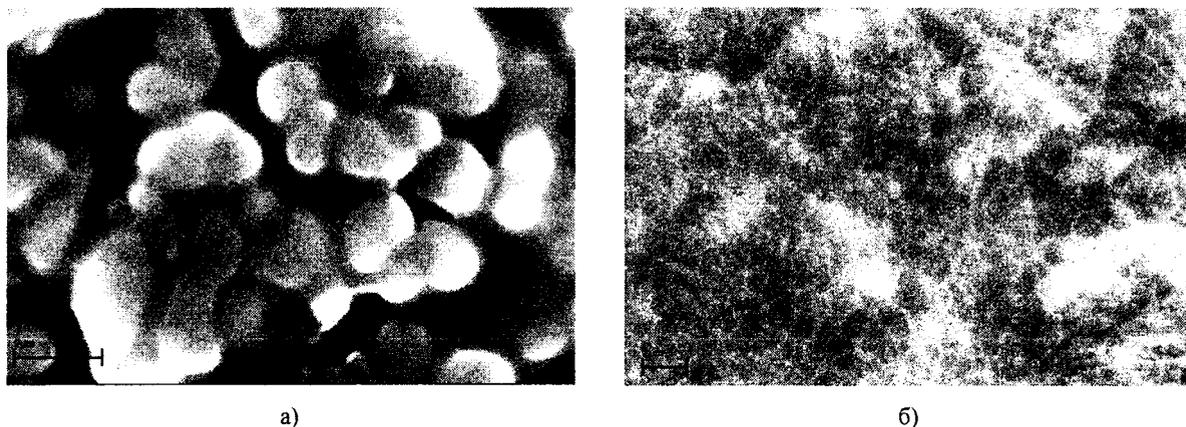


Рис. 1. Бугристая сторона фольги:
АЛ4 - 0,30 ат. % Cr - 0,90 ат. % Ni (а); АЛ4 - 0,90 ат. % Cr (б)

Анализ рентгенограмм исследуемой фольги позволяет утверждать, что основной фазой является пересыщенный твердый раствор на основе алюминия. С увеличением концентрации легирующих элементов в сплаве наблюдается уменьшение параметра элементарной ячейки кристаллической решетки (а) в соответствии с тем, что никель и хром сжимают кристаллическую решетку алюминия.

Фольга имеет микрокристаллическую структуру из-за условий затвердевания, при которых происходит быстрое зародышеобразование. Фольга текстурирована, причем наибольшее значение полюсной плотности p наблюдается для дифракционной линии 111. На долю данной ориентации зерен приходится до 30 % объема фольги, при этом текстура (111) несколько сильнее выражена на зеркальной стороне фольги, чем на бугристой. Полюсная плотность дифракционных линий для фольги исследованных сплавов представлена в таблице.

Полюсная плотность дифракционных линий

Индексы дифракционной линии, hkl	Сплав и сторона фольги				
	АЛ4 - 0,30 ат. % Cr - 0,90 ат. % Ni		АЛ4 - 0,15 ат. % Cr - 0,45 % Ni		АЛ4 - 0,90 ат. % Cr
	зеркальная	бугристая	зеркальная	бугристая	зеркальная
111	1,9	1,3	1,7	1,7	1,5
200	0,9	1,1	1,0	0,9	1,1
220	1,2	1,1	1,1	1,2	1,0
311	0,9	1,1	1,0	0,9	1,1
331	0,6	0,8	0,6	0,7	0,6
420	0,8	0,7	0,6	0,7	0,7

Преобладающей текстурой в алюминиевых сплавах, полученных традиционными методами кристаллизации, является (100). Возможность же формирования текстуры (111) следует из расчетов, приведенных в работе [4], величины энергетических барьеров для перемещения межфазной границы «кристалл - жидкость», совпадающей с той или иной кристаллографической плоскостью. Согласно с результатами вычислений, для плоскостей {111}, совпадающих с межфазной границей, дополнительная энергия для перемещения в нормальном направлении оказывается минимальной. Благодаря этому при плоском фронте кристаллизации развивается текстура (111).

Прослеживается зависимость физического уширения в снятых в прецизионной съемке линий (420) твердого раствора на основе алюминия от стороны фольги (например, на зеркальной поверхности для сплава АЛ4 - 0,15 ат. % Cr - 0,45 ат. % Ni физическое уширение составило 3,1 мрад, а на бугристой - 1,3 мрад, что соответствует более низкой относительной микродеформации кристаллической решетки). Этот факт является следствием неоднородности скорости охлаждения фольги - более далекие от кристаллизатора слои расплава остывают значительно медленнее, чем слои, непосредственно прилегающие к нему.

Микротвердость массивных литых гомогенизированных образцов исследованных сплавов колеблется в диапазоне 600...630 МПа. Микротвердость фольги, полученной сверхбыстрой закалкой, значительно (в 2...3 раза) выше твердости массивных образцов. Основной предполагаемый механизм увеличения микротвердости фольги относительно массивных литых образцов - образование пересыщенного твердого раствора, а также субмикроструктурной структуры.

Полученная фольга находится в метастабильном состоянии. Для исследования ее термической стабильности были проведены различные виды отжига. Как было обнаружено, поведение фольги, легированной хромом, существенно отличается от поведения фольги, легированной двумя металлами. Изохронный отжиг фольг показал следующие изменения микротвердости для фольги с присадками Ni и Cr (рис. 2):

- вначале при температурах отжига от 20 до 180 °С происходит уменьшение твердости;
- далее твердость резко возрастает, а при температуре выше 230 °С на столько же резко падает;
- затем в интервале температур от 320 до 410 °С наблюдается еще одно резкое повышение и снижение микротвердости, которое сменяется рекристаллизационным процессом с постепенным снижением твердости.

Добавление же только хрома убирает второй пик микротвердости, а первый сдвигает в область меньших температур (рис. 3).

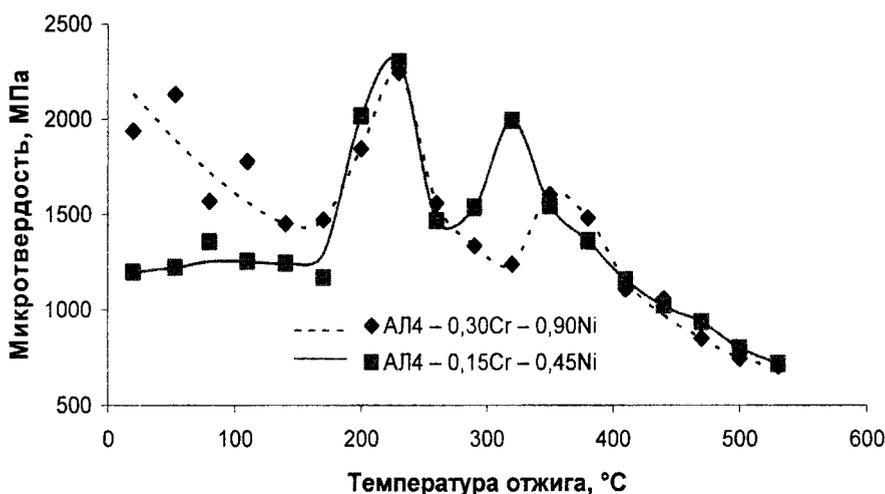


Рис. 2. Зависимость микротвердости быстрозатвердевшей фольги от температуры отжига для сплава Al4, легированного совместно никелем и хромом (погрешности опущены для улучшения восприятия формы графиков)

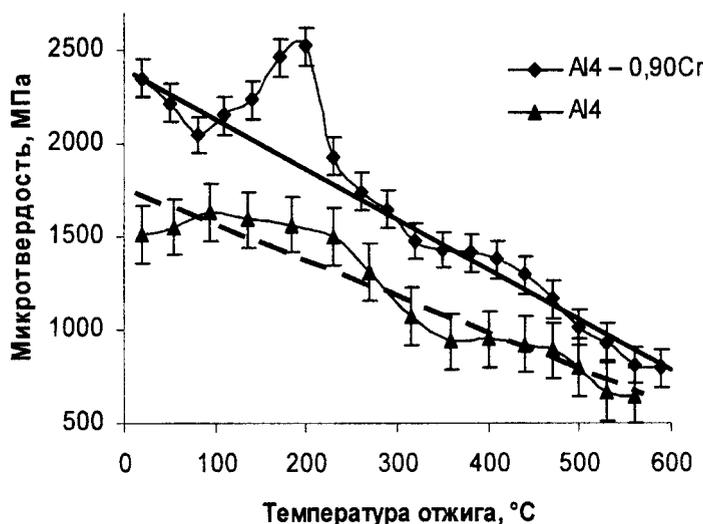


Рис. 3. Сравнение поведения при отжиге микротвердости быстрозатвердевшей фольги легированного хромом сплава Al4 со сплавом без добавок

Результаты анализа термической устойчивости механических свойств иллюстрируются рис. 4. При температурах отжига 200 и 300 °С происходит заметное упрочнение сплавов, а при 100 и 400 °С это явление не наблюдается. Четко прослеживается также и кратковременное падение микротвердости при температуре отжига, равной 300 °С.

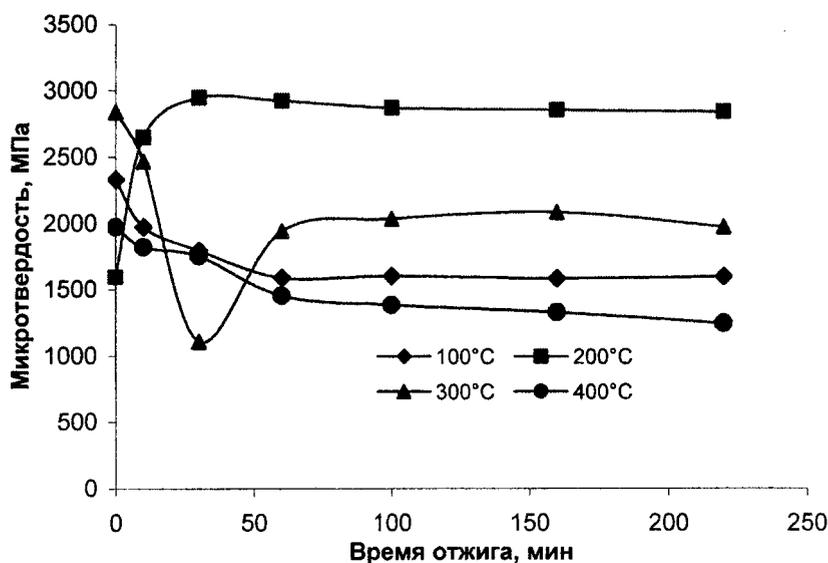


Рис. 4. Зависимость микротвердости быстрозатвердевшей фольги от времени длительного отжига для сплава Al4 - 0,30 % Cr - 0,90 % Ni

Аналогичные исследования, проведенные ранее над быстрозатвердевшими сплавами системы Al — Ni — Cr, позволяют представить следующую картину протекающих в фольге изменений. Первоначальное снижение твердости естественно связать с отжигом микронапряжений. Затем при повышении температуры диффузия становится более активной, поэтому возрастание микротвердости можно объяснить образованием и ростом включений Al_7Cr , а затем Al_3Ni , что должно приводить к увеличению физического уширения. Образование включений нарушает достигнутую на предыдущем этапе однородность твердого раствора - происходит старение сплава. В процессе роста включения постепенно растут, превращаясь в полукоргерентные и некогерентные. Это вызывает уменьшение микротвердости и физического уширения. Завершается эволюция включений их коалесценцией, что способствует протеканию собирательной рекристаллизации. При этом плотность линии (111) обычно несколько уменьшается.

Закключение. Суммируя результаты проведенных исследований, можно утверждать, что наблюдавшееся упрочнение фольг в исходном состоянии (по сравнению с литыми медленно охлажденными образцами) вызвано образованием пересыщенного твердого раствора на основе Al, возникновением микронапряжений, высокой плотностью межзеренных границ и мелкодисперсных включений. Полученные фольги сохраняют высокие механические свойства после кратковременного термического воздействия при 300 °С и выдерживают многочасовые термические нагрузки при 200 °С.

Выявленные сложные процессы распада твердого раствора и старения сплавов алюминия, легированных Ni и Cr, позволяют предложить их использование в качестве гранулируемых, жаропрочные характеристики этих сплавов могут превышать характеристики промышленно применяемых алюминиевых сплавов.

Работа выполнена при поддержке БРФФИ (проект Ф03-015).

ЛИТЕРАТУРА

1. Мондольфо Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов. - М.: Металлургия, 1979. - 640 с.
2. Garcia-Escorial A., Sánchez B., Cristina M.C., et al. // Mater. Sci. Eng. A. - 1991.-V. 134.-P. 1204-1207.
3. Sánchez B., Garda-Escorial A., Cristina M. C., et al. // Mater. Sci. Technol. - 1996. - V. 12. - P. 794 - 801.
4. Li D. Y., Szpunar I. A. // Mater. Sci. Lett. - 1994. -V. 13, № 21. -P. 1521.