

# МИКРОТВЕРДОСТЬ БЫСТРОЗАТВЕРДЕВШЕЙ ФОЛЬГИ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Al-Zr-X (X = Ni, Co, Mn) И ЕЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИ СТАРЕНИИ

Сивцова П.А., Шепелевич В.Г.

Белорусский государственный университет  
220050, Республика Беларусь, пр. Ф. Скорины, 4

Актуальной проблемой современного металловедения является исследование свойств быстрозатвердевших алюминиевых сплавов, которые находят широкое применение в качестве композитных материалов. Материалы, полученные методами сверхбыстрой закалки из расплава, характеризуются образованием микрокристаллической структуры, расширением области растворимости легирующих элементов, измельчением или отсутствием сегрегации, что приводит к появлению совершенно нового класса конструкционных материалов, которые невозможно получить традиционными методами [1]. Объектами исследования в данной работе были выбраны сплавы на основе системы Al – 0,3 ат. % Zr, легированной переходными металлами: никелем, кобальтом и марганцем. Растворимость Zr в алюминии составляет при комнатной температуре менее 0,015 ат. % [2]. Растворимости легирующих элементов — Ni, Co, Mn — менее 0,003 ат. %, 0,009 ат. % и 0,098 ат. % соответственно [2].

Исследуемые составы были получены сплавлением исходного состава Al – 0,3 ат. % Zr со сплавами Al – 1,2 ат. % Ni, Al – 2,4 ат. % Co, Al – 2,0 ат. % Mn в муфельной печи. Полученные сплавы имели номинальный состав: состав Al — 0,2 ат. % Zr – 0,7 ат. % Mn, Al – 0,2 ат. % Zr – 0,8 ат. % Co, Al – 0,2 ат. % Zr – 0,4 ат. % Ni. Фольги синтезировались упрощенным методом центробежной закалки [3]: капля расплава массой ~0,2 г инжесктировалась на внутреннюю полированную поверхность быстровращающегося медного барабана, частота вращения которого составляла 25 об/с. Максимальная длина полученных фольг достигала 7 см, ширина — 10 мм. Толщина исследуемой фольги находилась в пределах 30...80 мкм. Скорость охлаждения, как показал расчет [4], достигала единиц  $10^6$  К/с. Сторона, прилегающая к кристаллизатору, была гладкой и зеркальной, а противоположная сторона — матовой и бугристой.

Химический состав образцов изучался посредством растрового электронного микроскопа LEO 1455 VP. Микротвердость фольг по Виккерсу исследовалась с помощью микротвердомера ПМТ-3. Прилагаемая нагрузка составляла 20 г, время выдержки — 15 секунд. Изохронный отжиг исследуемых фольг проводился последовательно в температурном диапазоне 20–620 °С с шагом в 30 °С с выдержкой по 20 мин при каждой температуре. Ступенчатый изотермический отжиг для исследования микротвердости проводился при различных температурах в течение нескольких часов. Также исследовалась зависимость микротвердости от времени выдержки при комнатной температуре.

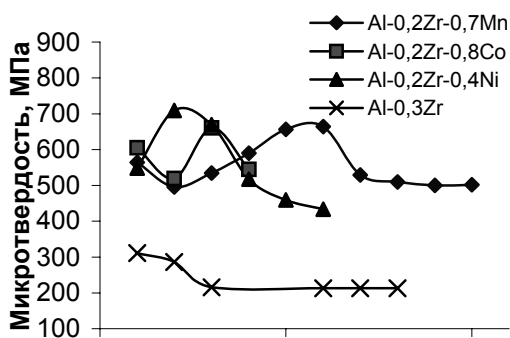


Рис. 1.

Поведение микротвердости исследованных сплавов в зависимости от времени выдержки.

Неотожженные фольги исследованных сплавов находятся в нестабильном состоянии. Выдержка образцов при комнатной температуре в течение нескольких суток демонстрирует следующее поведение микротвердости (рис. 1). Все образцы тройных сплавов продемонстрировали увеличение микротвердости в первые дни вылеживания с последующим ее уменьшением до значений, характерных для

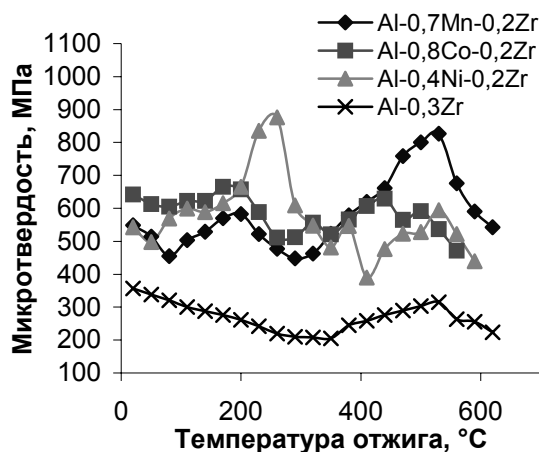


Рис. 2.

Поведение микротвердости исследованных сплавов при изохронном отжиге.

компонента меняются высота и ширина пиков. Так, первый пик наиболее высок для сплава с никелем, аналогичное явление наблюдается в быстрозатвердевших сплавах системы Al–Ni–Cr и объясняется выделением мелкодисперсного интерметаллида  $Al_3Ni$  [5]. Второй пик микротвердости наиболее высок для сплава с марганцем, что объясняется взаимным усилением действия легирующих элементов. Для бинарного быстрозатвердевшего сплава системы Al–Mn характерны два слабо выраженных максимума микротвердости [6], а в бинарной системе Al–Zr существует пик микротвердости в высокотемпературной области для гранул, полученных со скоростями охлаждения  $10^3$ – $10^4$  К/с [7]. Подобное поведение микротвердости при изохронном отжиге уже фиксировалось для тройных алюминиевых сплавов, полученных методом центробежной закалки и прокаткой [8–11].

Появление первого пика микротвердости не связано с процессами миграции легирующих элементов, приводящими к упрочнению при комнатной температуре. Изохронный отжиг фольги сплава Al–0,2 ат. % Zr–0,8 ат. % Co после ее недельной вылежки показал наличие тех же двух максимумов микротвердости. Причем первый максимум сместился в область более низких температур, что свидетельствует о завершении процессов, предваряющих его появление.

Выявленное поведение микротвердости не характерно для алюминиевых сплавов, полученных квазиравновесными способами. Для подтверждения полученных результатов был проведен изотермический отжиг фольги всех составов. Как пример на рисунке 3 приведена зависимость микротвердости фольги сплава системы Al – 0,2 ат. % Zr – 0,6 ат. % Mn от времени выдержки при ступенчатом изотермическом отжиге. Результаты этого вида

Таблица

Параметры быстрозатвердевшей фольги исследованных сплавов

Система	Температурный интервал пика микротвердости, °C		Увеличение микротвердости относительно подножия пика, МПа	
	Первого	Второго	Первого	Второго
Al–0,2 ат. % Zr–0,7 ат. % Mn	110–260	380–590	127	378
Al–0,2 ат. % Zr–0,8 ат. % Co	110–230	350–530	60	118
Al–0,2 ат. % Zr–0,4 ат. % Ni	140–320	440–590	379	205

свежеполученных образцов или более низких. Увеличение микротвердости в первые дни вылеживания, возможно, объясняется влиянием третьего легирующего элемента (Mn, Co и Ni соответственно). Падение микротвердости целесообразно связать с миграцией циркония к границам зерен и ослаблением, вследствие этого твердорастворного упрочнения, что демонстрирует бинарный сплав Al – 0,3 ат. % Zr.

Стабильность исследуемых фольг при более высоких температурах была исследована в процессе изохронного отжига. Он выявил неожиданно сложное поведение микротвердости (рис. 2). Фольги всех трех систем имеют два максимума микротвердости в близких температурных интервалах (таблица). Следует отметить, что в зависимости от вида третьего

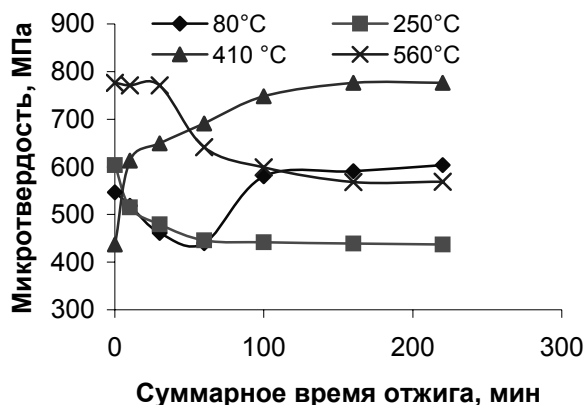


Рис. 3.

Поведение микротвердости фольги сплава Al – 0,2 ат. % Zr – 0,7 ат. % Mn при изотермическом отжиге.

Al<sub>3</sub>Zr с последующей их коалесценцией. Это способствует протеканию процесса собирательной рекристаллизации, начинающейся значительно позже из-за влияния циркония [1].

Таким образом, быстрозатвердевшая фольга тройных сплавов системы Al – Zr – X демонстрирует нехарактерное для квазиравновесных сплавов поведение механических свойств, как при комнатной температуре, так и при старении. Это позволяет говорить о вероятном потенциале их использования как конструкционных материалов и в качестве полуфабрикатов к композиционным заготовкам.

#### Литература.

1. Калиниченко А. С., Бергманн Г. В. Управляемое направленное затвердевание и лазерная обработка: теория и практика. — Мн.: Технопринт, 2001. — 367 с.
2. Мондольфо Л. Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов. — М.: «Металлургия», 1979. — 640 с.
3. Васильев В. А., Митин Б.С., Пашков И.Н., Серов М.М., Скуридин А.А., Лукин А.А., Яковлев В.Б. Высокоскоростное затвердевание расплава (теория, технология и материалы). / Под ред. Б.С. Митина — М.: "СП ИНТЕРМЕТ ИНЖИНИРИНГ". 1998. — 400 с.
4. Мирошниченко И. С. Закалка из жидкого состояния. — М.: Metallurgia, 1982. — 168 с.
5. Сивцова П. А., Шепелевич В. Г. // В Машиностроение: Респ. межвед. сб. науч. трудов. Вып. 19. — Мн.: УП «Технопринт», 2003. — 793 с.
6. Василевич Е. Ю., Шепелевич В. Г. // В Теоретическая и прикладная механика: Межвед. сб. науч.-метод. статей. — Мн.: УП «Технопринт», 2002. — 250 с.
7. Елагин В. И. Легирование деформируемых алюминиевых сплавов переходными металлами. — М.: «Металлургия», 1975. — 248 с.
8. Сивцова П. А., Шепелевич В. Г. // Вестник Белорусского Государственного Университета. Серия 1. Мн.: БГУ — 1/2005. — Сс. 47–51
9. Сивцова П. А., Шепелевич В. Г. // Актуальные проблемы прочности: Материалы XLIII Международной конференции. Часть 2. — Витебск, Беларусь. 2004 г. — 332 с.
10. Сивцова П. А. // Сб. трудов молодых ученых НАН Беларуси. Том 4. — Мн.: ИП Логвинов, 2004. — 312 с.
11. Гусакова С. В., Сивцова П. А., Шепелевич В. Г. // В Машиностроение: Респ. межвед. сб. науч. трудов. Вып. 20. Т. 2. — Мн.: УП «Технопринт», 2004. — 400 с.

отжига для всех исследованных сплавов подтвердили результаты изохронного отжига. Это доказывает, что наблюдаемое при изохронном отжиге двойное упрочнение не является особенностью данного вида отжига, а характерно для этих сплавов в целом. Первый пик микротвердости, наблюдаемый при изохронном отжиге во всех сплавах, объясняется первичным распадом пересыщенного твердого раствора с выделением интерметаллидных фаз на основе алюминия: Al<sub>6</sub>Mn, Al<sub>9</sub>Co<sub>2</sub> и Al<sub>3</sub>Ni, соответственно. Последующее уменьшение микротвердости связано с укрупнением и коалесценцией этих включений. Наличие второго пика объясняется выделением частиц интерметаллида