Национальный исследовательский Томский государственный университет АО «Федеральный научно-производственный центр «Алтай» Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук

> К 145-летию со дня основания Томского государственного университета

ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И СПЕЦИАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ: АНТИТЕРРОРИЗМ, БЕЗОПАСНОСТЬ И ГРАЖДАНСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

Сборник научных трудов

XVII Международной конференции «HEMs-2022» 14–16 сентября 2022 г. (Республика Алтай, Россия)

> Томск Издательство Томского государственного университета 2022

Заключение. В результате проведенных исследований структуры покрытий на основе AlMgB₁₄ обнаружено, что структура поверхности покрытий изменяется при увеличении напряжения смещения – это происходит в результате увеличения интенсивности процесса бомбардировки покрытия ионами в ходе напыления. Исследования механических свойств покрытий на основе AlMgB₁₄ показали, что наибольшим значением твёрдости (17 ГПа), наименьшим коэффициентом трения (0,08–0,12) и меньшей скоростью износа ($7,4\cdot10^{-5}$ мм³/H·м) покрытия обладает образец, полученный при напряжении смещения 100 В. Таким образом, оптимальным режимом нанесения покрытий на основе AlMgB₁₄ является напряжение смещения 100 В.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания № FSWM-2020-0028. Исследования (электронная и атомно-силовая микроскопия, наноиндентирование) выполнены на оборудовании Томского регионального центра коллективного пользования Национального исследовательского Томского государственного университета. Центр поддержан грантом Министерства науки и высшего образование Российской Федерации № 075-15-2021-693 (№ 13.ЦКП.21.0012).

Литература

- Cook B.A. et al. A new class of ultra-hard materials based on AlMgB14 // Scr. Mater. Elsevier BV. 2000. V. 42, No. 6. P. 597–602.
- 2. Qu W. et al. Influence of boron contents on properties of AlMgB films prepared by RF magnetron sputtering // Rare Metals. 2012. V. 31, No. 2. P. 164–167.
- Oliver W.C., Pharr G.M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments // J. Mater. Res. 1992. V. 7, No. 6. P. 1564–1583.

УДК 67.017

ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ ВОЛЬФРАМА НА МИКРОСТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА АМг5

Мубараков Р.Г., Хрусталев А.П., Кахидзе Н.И.

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск E-mail: raul.mub@mail.ru

Аннотация. В данной работе исследуется влияние наночастиц вольфрама на микроструктуру и механические свойства сплава АМг5. Увеличение содержания вольфрама до 0,8 мас. % позволило модифицировать микроструктуру сплава АМг5. Модификация микроструктуры, а также дисперсионное упрочнение наночастицами привели к одновременному увеличению предела текучести, предела прочности при растяжении и пластичности сплава АМг5.

Введение. Алюминиево-магниевые сплавы имеют широкий спрос в автомобильной, морской, авиационной и другой промышленности ввиду их физико-механических свойств, коррозионной стойкости, дешевизны и возможности переработки. В качестве армирующих частиц в алюминиевых сплавах могут использоваться наночастицы вольфрама. Вольфрам имеет высокую температуру плавления и прочность, а также низкий коэффициент теплового расширения. Известно, что частицы вольфрама и интерметаллиды Al-W способны улучшать механические свойства сплава АМг5 [1]. Главными проблемами введения наночастиц являются флотация и агломерация. Для решения данных проблем наночастицы вводятся в виде лигатур, что позволяет достичь равномерного распределения частиц по всему сплаву.

Целью данной работы является исследование влияния наночастиц вольфрама на микроструктуру и механические свойства сплава АМг5 с различным содержанием вольфрама.

Материалы и методы исследования. В качестве исходного сплава использовался сплав АМг5. В качестве упрочняющих частиц использовался вольфрамовый порошок, полученный методом электрического взрыва проводника, средний размер частиц вольфрама составляет 200 нм. Лигатуру Al-W получали путем смешивания 95 мас. % W и 5 мас. % Al в планетарной мельнице при дальнейшем прессовании на гидравлическом прессе при нагрузке 0,5 т.

Метод получения сплава был следующим. В графитовый тигель помещали 1 кг сплава AMr5, расплавляли в муфельной печи при температуре 780 °C и выдерживали в течение 2 ч. Затем при температуре 730 °C вводили лигатуру Al-W, и после полного растворения лигатуры проводилась ультразвуковая обработка в течение 2 мин. При температуре 720 °C расплав разливали в кокиль. Количество наночастиц W в сплаве варьировалось от 0,3 до 0,8 мас. %. Исходный сплав AMr5 был получен при аналогичных условиях без введения наночастиц W.

Методом оптической микроскопии была исследована микроструктура полученных образцов на микроскопе Olympus GX71 (Томский материаловедческий центр коллективного пользования (ТМЦКП)), оснащённом поляризационным фильтром, средние размеры зерен были рассчитаны методом случайных секущих. Твердость была определена по методу Бринелля на твердомере МЕТОLAB-703 (ТМЦКП) с нагрузкой 62,5 кг на стальной шар диаметром 2,5 мм и выдержкой 10 с. Микротвердость по Виккерсу определяли на твердомере МЕТОLAB-502 (ТМЦКП) с нагрузкой 50 г на алмазный индентор и выдержкой 10 с. Испытания на растяжение проводились на разрывном испытательном стенде Instron-3369 (ТМЦКП) со скоростью движения подвижной траверсы 0,2 мм/мин при комнатной температуре.

Результаты. На рис. 1 представлены оптические изображения полученных сплавов. Микроструктура исходного сплава АМг5 состоит из равноосных зерен со средним размером 180 мкм.



Рис. 1. Оптическое изображение микроструктур: АМг5 (*a*); АМг5–0,3W (*б*); АМг5–0,5W (*в*); АМг5–0,8W (*г*)

Введение 0,3 и 0,5 мас. % W приводит к незначительному уменьшению среднего размера зерна, который составил 164 и 149 мкм соответственно. Введение 0,8 мас. % приводит к уменьшению среднего размера зерна до 95 мкм. Известно, что измельчение зерна в алюминиевых сплавах возможно за счет образования зародышей и торможения роста зерна во время затвердевания расплава [2].

В таблице приведены механические характеристики исследуемых сплавов. Наилучшие механические свойства при введении 0,8 мас. % W приводят к увеличению значений твердости, микротвердости, условного предела текучести, предела прочности и максимальных деформаций до разрушения. Увеличение механических характеристик происходит по закону Холла–Петча и по механизму Орована [3].

Сплав	Средний размер зерна, мкм	Твердость, НВ	Микротвердость, HV	σ _{0.2} , МПа	σ _в , МПа	ε _{max} , %
АМг5	180 ± 5	57 ± 3	68 ± 9	80 ± 2	155 ± 6	$5,2 \pm 0,4$
АМг5-0,3W	164 ± 4	64 ± 1	71 ± 10	$85 \pm 1,6$	164 ± 5	$6,4 \pm 0,7$
АМг5-0,5W	149 ± 6	69 ± 1	73 ± 9	79 ± 1	185 ± 7	$8,5 \pm 0,5$
АМг5-0,8W	95 ± 4	75 ± 2	81 ± 7	$91 \pm 2,2$	194 ± 6	10,3±0,7

Средний размер зерна, твердость и механические свойства сплавов

Заключение. Установлено, что введение наночастиц 0,8 мас. % W позволяет уменьшить средний размер зерна сплава AMr5 от 180 до 95 мкм за счет образования интерметаллической фазы Al–W. Введение 0,8 мас. % наночастиц увеличило твердость и микротвердость сплава от 57 до 75 и от 67 до 81 HB соответственно, предел текучести – от 80 до 91 МПа, предел прочности при растяжении – от 155 до 194 МПа и пластичность – от 5,2 до 10,3%. Доминирующими механизмами повышения механических свойств сплава являются механизм Орована и закон Холла–Петча.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (государственное задание № FSWM-2020-0028).

Литература

- 1. Dixit S., Kashyap S., Kailas S.V. Chattopadhya K. Manufacturing of high strength aluminium composites reinforced with nano tungsten particles for electrical application and investigation on in-situ reaction during processing // Journal of Alloys and Compounds. 2018. V. 767. P. 1072–1082.
- Mohanty P.S., Gruzleski J.E. Mechanism of grain refinement in aluminium // Acta Metall. Mater. 1995. No. 43. P. 2001–2012.
- 3. Zhang Z., Chen D.L. Contribution of Orowan strengthening effect in particulate-reinforced metal matrix nanocomposites // Mater. Sci. Eng. 2008. P. 483–484.