

## **ВЛИЯНИЕ СОСТАВА И МИКРОРЕЛЬЕФА НА СМАЧИВАЕМОСТЬ БЫСТРОЗАТВЕРДЕВШИХ ФОЛЬГ СПЛАВОВ**

**Al–Mg–Zr и Al–Mg–Cu–Mn–Fe**

**Столяр И.А.<sup>1</sup>, Ташлыкова-Бушкевич И.И.<sup>2</sup>, Шепелевич В.Г.<sup>1</sup>,  
Бондаренко А.В.<sup>2</sup>, Рощин Л.Ю.<sup>3</sup>, Толстая Т.Н.<sup>3</sup>, Русецкая Т.Б.<sup>2</sup>,  
Бобрик А.Ю.<sup>2</sup>, Wu R.<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>УО «Белорусский государственный университет»,  
220050, Беларусь, г.Минск, пр. Независимости, д.4

E-mail: uyluana@gmail.com

<sup>2</sup>УО «Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»,  
220013, Беларусь, г.Минск, ул. П. Бровки, д.6

<sup>3</sup>Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси,  
220072, Беларусь, г.Минск, ул. П. Бровки, д.15

<sup>4</sup>Harbin engineering university,  
150001, PR China, Harbin, Nangang District, Nantong Str. 145

В последние десятилетия возрастают требования к служебным характеристикам алюминиевых сплавов системы Al–Mg из-за развития и расширения областей их эксплуатации в машиностроении, транспортной и авиационной промышленности. Сплавы данной системы обеспечивают конструктивную прочность, хорошую пластичность и коррозионную стойкость деталей в агрессивных газовых и жидких средах [1]. Для улучшения свойств сплавов системы Al–Mg активно проводится поиск методов модифицирования их структуры. Получение сплавов сверхбыстрой кристаллизацией из расплава позволяет достичь высокой дисперсности и равномерного распределения упрочняющих фаз, а также сформировать пересыщенный твердый раствор, что приводит к повышению физико-химических и механических свойств материалов. Известно, что окисление алюминия происходит с образованием на нем тонкой окисной пленки, обеспечивающей коррозионную стойкость материала в агрессивных средах [1]. Образование кислородсодержащих соединений на поверхности сплавов на основе алюминия может снижать или усиливать положительные эффекты, достигнутые за счет

модифицирования структурно-фазового состояния образцов при неравновесной кристаллизации. Поэтому актуально изучение влияния химического состава сплавов на структурно-фазовое состояние приповерхностных слоев.

В настоящей работе рассматривается влияние элементного состава и микрорельефа на смачивающие свойства фольг экспериментального сплава Al–Mg–Zr и многокомпонентного сплава Al–Mg–Cu–Mn–Fe, полученных высокоскоростной кристаллизацией. Морфология поверхности образцов исследовалась методом сканирующей зондовой микроскопией. Характер смачиваемости фольг определялся методом покоящейся капли.

Быстрозатвердевшие (БЗ) экспериментальный сплав Al–Mg–Zr (Al-1.37% Mg-0.21% Zr (мас.%) и промышленный сплав 1191 (Al-2,76% Mg-3,52% Cu-0,77% Mn-0,3% Fe (мас.%) были получены с помощью метода центробежной закалки из жидкой фазы при одностороннем охлаждении на внутренней поверхности вращающегося медного цилиндра. Скорость охлаждения расплава была порядка  $10^6$  К/с при частоте вращения 1500 об/мин. Толщина изученных фольг составила 40-80 мкм. Микроструктура и состав анализировались для обеих поверхностей образцов: А – поверхность, контактирующая с цилиндром, Б – поверхность, контактирующая с воздухом. Морфология и шероховатость поверхности фольг сплавов Al–Mg–Zr и 1191 изучалась с помощью SOLVER P47 PRO. Полученные снимки  $20 \times 20$  мкм обрабатывались программой Image Analysis. Параметр  $S_a$  (среднеарифметическая шероховатость), характеризующий шероховатость образцов, определялся по данным пяти площадок, произвольно выбранных для каждого сплава. Погрешность измерения  $S_a$  была около 4%. Смачиваемость образцов дистиллированной водой определялась по равновесному краевому углу смачивания (РКУС)  $\theta$  методом покоящейся капли на воздухе. Объем капли был около 1,7-2,0 мкл, время стабилизации системы фольга-капля составляло 20 с. Погрешность измерения равновесного краевого угла  $\theta$  была около 5%.

На рис. 1 показаны типичные топографические изображения поверхностей А и Б фольг сплавов Al–Mg–Zr (а, в) и 1191 (б, г) вместе с

изображениями капель дистиллированной воды, а также профиля распределения неровностей вдоль выделенной белой линии. Обе поверхности фольг сплавов имеют аperiodичную зеренную структуру. Поверхность А характеризуется зеркальным блеском и при кристаллизации на ней формируются вытянутые раковины. Для поверхности Б, имеющей бугристую структуру, характерна матовость. Получено, что без использования травления определить размер зерен поверхности А затруднительно. Средний размер зерен поверхности Б для фольг сплава Al–Mg–Zr составляет 2-9 мкм, для фольг сплава 1191 – 0,5-4,5 мкм. На отдельных участках поверхности перепад высот рельефа достигает 400-500 нм для фольг сплава Al–Mg–Zr и 200-300 нм для фольг сплава 1191. Среднеарифметическая шероховатость  $S_a$ , измеренная для разных сплавов, варьировалась в интервале 85–180 нм и указана в табл. 1. Отметим, что значения шероховатости поверхности А, как правило, выше, чем поверхности Б.

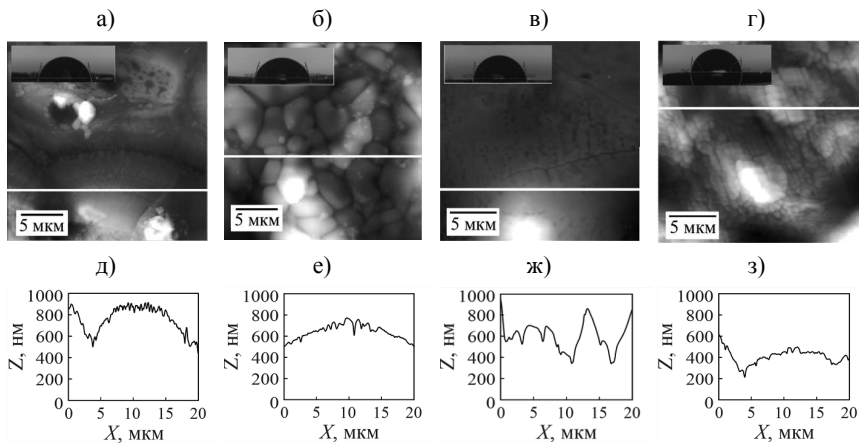


Рисунок 1 - АСМ-изображения и профили поперечного сечения рельефа поверхностей А (а, в, д, ж) и Б (б, г, е, з) БЗ фольг сплавов Al–Mg–Zr и Al–Mg–Cu–Mn–Fe соответственно. На вставках показана форма капель дистиллированной воды на поверхности образцов

Установлено, что величина шероховатости, усредненная по значениям обеих поверхностей фольг, в случае экспериментального сплава

Al–Mg–Zr в 1,4 раза больше, чем у промышленного сплава Al–Mg–Cu–Mn–Fe и составляет 162,25 нм и 112,41 нм соответственно. Для Al–Mg–Zr усредненное значение краевого угла составляет 76,88°, а для Al–Mg–Cu–Mn–Fe – 80,88°. Обнаруженное ухудшение свойств смачиваемости при снижении шероховатости позволяет сделать вывод о том, что механизм является гомогенным и описывается моделью Венцеля-Дерягина.

Таблица 1

**Значения параметров и показателей, описывающих шероховатость и смачиваемость БЗ фольг сплавов Al–Mg–Zr и Al–Mg–Cu–Mn–Fe**

Параметр/показатель	Al–Mg–Zr		Al–Mg–Cu–Mn–Fe	
	А	Б	А	Б
Sa, нм	178,42	146,07	139,89	84,92
Средний КУ (ср), °	79,65	74,11	78,74	83,01
Средний КУ (л), °	80,40	73,90	79,73	83,15
Средний КУ (п), °	78,90	74,32	77,75	82,87
Средний объем, мкл	1,74	2,00	2,01	1,70
Средний диаметр, мм	2,06	2,25	2,18	1,98
Средняя трехфазная точка, мм	5,3	5,2	5,9	5,5

Шероховатость, как известно, влияет на процессы адсорбции на поверхности металлов. В работах по изучению коррозии отмечается зависимость свойств поверхности металлов, прежде всего d-металлов, от пленок оксидов, по крайней мере при образовании  $Al_2O_3$ , MgO и  $Fe_2O_3$  [2]. Поэтому интерес вызывает сообщение о снижении степени смачиваемости образцов из меди и стали в результате роста шероховатости, когда по данным авторов слой естественного оксида на поверхности металлов уменьшается [3]. В настоящей работе рост шероховатости фольг, наблюдаемый при сравнении, например, поверхностей Б промышленного (84,92 нм) и экспериментального (146,07 нм) сплавов, наоборот приводит к улучшению смачиваемости, сопровождаемому снижением величины РКУС: контактный угол уменьшился с 83 до 74° (т.е. на 10%). Возможной причиной является влияние элементного состава приповерхностных слоев сплавов системы Al–Mg на смачивание фольг. Заметим, что в промышленном сплаве Al–Mg–Cu–Mn–Fe расчетная концентрация магния

составляет 2,76 мас. %, т.е. в 2 раза выше, чем в экспериментальном сплаве Al–Mg–Zr (1,37 мас. %). В то же время известно, что магний является активным легкоокисляемым металлом. Поэтому можно предположить, что в процессе высокоскоростной кристаллизации атомы магния диффундируют на поверхность фольг, где они вступают в реакцию с кислородом и образуют оксид MgO. Об обогащении поверхности магнием сообщалось ранее для БЗ фольг сплава системы Al–Mg–Li [4], а также образцов, полученных методами интенсивной пластической деформации, в работах [5]. Следовательно, степень обогащения поверхности фольг магнием ожидаемо будет меньше в экспериментальном сплаве, обуславливая различия в составе и химическом состоянии поверхности алюминиево-магниевых материалов. О гетерогенной структуре поверхностного оксидно-гидроксидного слоя БЗ алюминия и его сплавов с хромом, включая области несплошности оксида на поверхности фольг, а также переходе от плохой к низкой смачиваемости водой при легировании алюминия хромом нами сообщалось в [6]. Таким образом, для модифицирования структуры сплавов алюминия высокоскоростной кристаллизацией из расплава и управления физико-химическими свойствами требуется продолжение исследований морфологических особенностей и фазового состава оксидно-гидроксидных слоев различных систем легирования.

#### Литература

1. Medjahed A., Henniche A., Derradji M., Yu T., Wang Y., Wu R., Hou L., Zhang J., Li X., Zhang, M. Effects of Cu/Mg ratio on the microstructure, mechanical and corrosion properties of Al-Li-Cu-Mg-X alloys // Mater. Sci. Eng. A. - 2018. V.718. - P. 241-249.
2. Кузнецов Ю. И. Современное состояние теории ингибирования коррозии металлов // Защита металлов. - 2002. Т. 38. № 2. - С. 122-131.
3. Исламова А.Г., Феоктистов Д.В., Орлова Е.Г. Влияние шероховатости на поверхностную энергию и смачиваемость поверхностей меди и стали // Вестник Тюменского госуниверситета. - 2021. - Т. 7. - № 1 (25). - С. 60-78.
4. Бушкевич И.А., Шепелевич В.Г. Элементный и фазовый состав быстрозатвердевшего сплава 1421 системы Al–Li–Mg с добавками Sc и Zr

- // Взаимодействие излучений с твердым телом : материалы 12-й Междунар. конф., 19-22 сент. 2017 г. - Минск, 2017 - С. 211-213.
5. Кикин П.Ю., Перевезенцев В.Н., Русин Е.Е. // Физика металлов и металловедение. - 2015. Т. 116. № 8. - С. 854.
6. Ташлыкова-Бушкевич И.И., Шепелевич В.Г., Амати М., Грегоратти Л., Кискинова М. Влияние хрома на химический состав и свойства поверхности быстро затвердевших сплавов Al-Cr // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. - 2020. №1. - С. 81-88.