

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОРФОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ БЫСТРОЗАТВЕРДЕВШИХ ФОЛЫГ СПЛАВА СИСТЕМЫ Al-Mg-Cu

<sup>1</sup> Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup> Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
Минск, Беларусь

Сканирующая зондовая микроскопия использована для получения информации об ансамбле шероховатости поверхностей с различными типами рельефа быстрозатвердевших фольг сплава Al-Mg-Cu-Mn-Fe. Размер поля сканирования был равен 20×20 мкм и 50×50 мкм. Обнаружено, что субструктура фольг в зависимости от поверхности анализа характеризуется наличием внутризеренных областей (ячеек) размером 0,5-3,0 мкм. Средняя арифметическая шероховатость поверхности фольг, контактирующей с закалочным барабаном, составляет 112,2 нм при сканировании участков 20×20 мкм. Для областей фольг, имеющих ячеистую структуру, установлено снижение шероховатости поверхности. Получено, что с увеличением размера поля сканирования морфологическая неоднородность поверхности фольг растет. Гистограммы распределения неровностей аппроксимированы нормальным распределением.

Известно, что в различных областях промышленности, в том числе порошковой металлургии и авиакосмической отрасли, среди широко используемых материалов важное место занимают термические упрочняемые сплавы системы Al-Mg [1]. Совместное легирование алюминия Cu и Mg позволяет улучшить показатели прочности и пластичности за счет увеличения концентрации вакансий и дислокаций в сплавах, приводя к образованию и измельчению зон Гинье-Престона. В равновесии с алюминиевым твердым раствором находятся двойные фазы  $\theta$  (Al<sub>2</sub>Cu) и Al<sub>8</sub>Mg<sub>5</sub> и тройные фазы Al<sub>2</sub>CuMg (*S*) и Al<sub>6</sub>CuMg<sub>4</sub> (*T*). Они характеризуются переменной растворимостью в алюминии, что позволяет осуществлять термическую обработку для улучшения свойств сплавов без изменения их химического состава. Наибольший эффект упрочнения наблюдается благодаря присутствию *S*-фазы [2, 3], которая также положительно влияет и на жаропрочные свойства. Получение сплавов при высоких скоростях охлаждения (порядка 10<sup>6</sup> К/с) дополнительно позволяет повысить физико-механические свойства материалов за счет увеличения растворимости легирующих добавок, образования метастабильных фаз, а также измельчения зерен [4]. Поэтому применение методов сверхбыстрой закалки из расплава (СБЗР) считается высокоэффективным для улучшения свойств уже известных сплавов и расширения их области применения.

Целью данной работы было исследовать морфологию и топографию быстрозатвердевших (БЗ) фольг промышленного сплава 1191 системы Al-Mg-Cu с помощью сканирующей зондовой микроскопии. Статистические характеристики рельефа изучались в зависимости от поверхности анализа фольг.

Фольги сплава 1191 (Al-3,17% Mg-1,55% Cu-0,39% Mn-0,15% Fe) (ат.%) были получены методом центробежной закалки, когда капля расплава затвердевает на внутренней поверхности вращающегося медного цилиндра. Скорость охлаждения расплава составляла около 10<sup>6</sup> К/с. Толщина фольг была порядка 40-80 мкм. Морфология поверхности БЗ неотожженных фольг изучалась при помощи атомно-силового микроскопа (АСМ) SOLVER P47 PRO с полем сканирования 20×20 мкм и 50×50 мкм. В программе Image Analysis были определены статистические параметры поверхности по АСМ-изображениям (среднеарифметическая шероховатость  $S_a$ , островершинность  $S_{ka}$  и асимметричность  $S_{sk}$ ). Гистограммы распределения неровностей анализировались с использованием математического пакета программы OriginPro. Построенные гистограммы распределения высот шероховатости поверхности аппроксимировались функцией Гаусса.

На рис. 1 показаны типичные АСМ-изображения БЗ фольг сплава 1191 с полем сканирования 20×20 мкм и 50×50 мкм. Сторона фольги, которая прилегала к поверхности цилиндра-кристаллизатора (поверхность А), имела блестящую, гладкую поверхность (рис. 1 а). На

данной стороне обнаружены раковины микронных размеров, дно которых имело ячеистую структуру. Ячейки характеризовались преимущественно вытянутой формой с размером 0,5-3,0 мкм (рис. 1 в). Противоположная сторона фольги (поверхность Б) была матовой и бугристой, состояла из впадин и выступов. При этом ячеистая структура наблюдалась на всей ее поверхности (рис. 1 д).

Более детальную информацию о рельефе поверхностей исходных фольг сплава 1191 демонстрируют гистограммы распределения высот неровностей поверхностей А и Б. Статистический анализ показал, что средняя шероховатость  $S_a$  площадки  $20 \times 20$  мкм поверхности А составляет 112,2 нм, для поверхности Б – 87,9 нм. Однако, для областей каверн, имеющих ячеистую структуру,  $S_a$  имеет меньшее значение, например, равное 33,1 нм для участка на рис. 1 в. С увеличением поля сканирования поверхности А до  $50 \times 50$  мкм  $S_a$  возрастает до 210,0 нм. Рельеф поверхности А характеризуется следующими параметрами острровершинности и асимметричности:  $S_{sk} = 2,19$ ,  $S_{ka} = 4,97$  и  $S_{sk} = -0,32$ ,  $S_{ka} = 0,059$  для площадок  $20 \times 20$  мкм, изображенных на рис. 1 а и рис. 1 в соответственно, и  $S_{sk} = -0,41$ ,  $S_{ka} = 1,70$  для площадки  $50 \times 50$  мкм на рис. 1 ж. Для площадки  $20 \times 20$  мкм поверхности Б, изображенной на рис. 1 д, получено, что  $S_{sk} = 0,18$ ,  $S_{ka} = 1,14$ . Дополнительно была выполнена аппроксимация гистограмм распределения высот шероховатости в области основного максимума, обусловленного мелкомасштабными шероховатостями, с использованием распределения Гаусса, рис. 1 б, з, е, з. Величина полной ширины на полувысоте (FWHM) нормального распределения, аппроксимирующего гистограммы распределения неровностей, составила 61,1 нм, 97,5 нм, 218,4 нм и 464,4 нм для рис. 1 б, з, е, з соответственно.

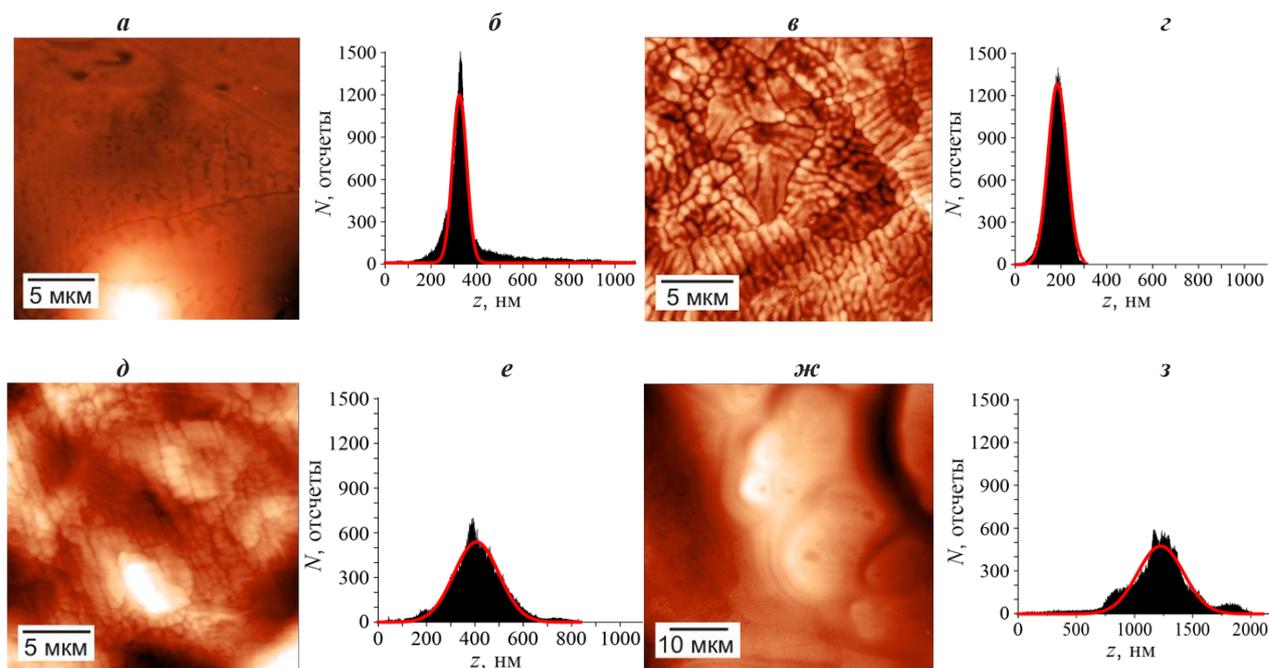


Рисунок 1 – Характерные примеры топографии поверхности БЗ фольг сплава 1191: АСМ-изображения поверхностей А (а, в, ж) и Б (д) в зависимости от размера кадра и соответствующие гистограммы распределения высот шероховатости поверхностей А (б, з, з) и Б (е), аппроксимированные распределением Гаусса.

Процессы кристаллизации определяют морфологию и топографию поверхности БЗ фольг, которые влияют на их физико-механические свойства. При получении фольг методом СБЗР на их поверхности наблюдается образование ячеек в зависимости от стороны анализа. Наличие ячеек в области каверн поверхности А можно объяснить тем, что гладкие участки поверхности, прилегающие к цилиндру, имеют скорость охлаждения больше, чем участки, где образовывались каверны [5]. Ячеистая структура присутствует на всей поверхности Б, поскольку скорость охлаждения свободно затвердевающей поверхности, контактирующей с воздухом, меньше. Исследование методом АСМ показало, что в пределах каждого зерна

ячейки преимущественно вытянуты в одном направлении. При сравнении средней шероховатости поверхности дна каверн с другими визуально гладкими участками поверхности А обнаруживается резкое уменьшение  $S_a$  более, чем в 3 раза в случае ячеистой структуры. При этом вид гистограмм распределения высот неровностей двух площадок аналогичен (рис. 1 а, в). Однако, функция распределения по высотам у типичной площадки поверхности А, показанной на рис. 1 а, отличается наличием негауссового хвоста: на рис. 1 б в диапазоне высот от 400 до 900 нм. Проведение аппроксимации гистограмм показало их отклонение от распределения Гаусса в случае многомодовости распределения и согласуется с измеренными значениями параметров островершинности и асимметричности. Получено, что значение среднеарифметической шероховатости значительным образом зависит от размера АСМ-кадра. С увеличением области сканирования до  $50 \times 50$  мкм морфологическая неоднородность поверхности фольг растет. Гистограмма распределения высот уширяется, что указывает на более развитый рельеф поверхности большей площади.

Представленные результаты указывают на перспективность продолжения исследования влияния легирующих компонентов на процессы структурообразования при высокоскоростной кристаллизации сплавов системы Al–Mg. В работе показано, что метод АСМ хорошо подходит для решения данной задачи, имеющей фундаментальное и прикладное значения, поскольку с его помощью достигается сканирование поверхности фольг с разрешением нанометрового масштаба для получения количественной информации о микроструктуре материала, включая морфологию, а также топографических карт и распределений высот шероховатости поверхности образцов.

Авторы выражают благодарность зав. сектором научных исследований Л.В. Баран (Белорусский межвузовский центр обслуживания научных исследований, БГУ) за помощь при проведении экспериментов с использованием метода АСМ.

#### Список литературы

1. Андрияшкин, А. Ю. Производство сварных конструкций в ракетнокосмической технике: учебное пособие / А.Ю. Андрияшкин, О.О. Галинская, А.Б. Сигаев // Балт. гос. техн. ун-т. – 2015. – 104 с.
2. Калинин, Б. А. Физическое материаловедение / Б.А. Калинин, П.А. Платонова, И.И. Чернов, Я.И. Штромбах // М.: МИФИ. – 2008. – 604 с.
3. Zuiko, I. S. Suppression of abnormal grain growth in friction-stir welded Al–Cu–Mg alloy by lowering of welding temperature / I.S. Zuiko, S. Mironov, S. Betsofen, R. Kaibyshev // Scripta Materialia. – 2021. – Vol. 196. – P. 1-4.
4. Kurz, W. Progress in modelling solidification microstructures in metals and alloys. Part II: dendrites from 2001 to 2018 / W. Kurz, M. Rappaz, R. Trivedi // International Materials Reviews. – 2020. – 64(1). – P. 1-47.
5. Шепелевич, В. Г. Структура и механические свойства быстрозатвердевших фольг сплавов Sn–Cd / В. Г. Шепелевич, О. В. Гусакова // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2006. – №12. – С. 98-102.