

МОРФОЛОГИЯ И ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ КАК ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ СМАЧИВАЕМОСТЬ ПОВЕРХНОСТЕЙ ФОЛЬГ СПЛАВОВ АЛЮМИНИЯ, ПОЛУЧЕННЫХ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИЕЙ

И. И. Ташлыкова-Бушкевич¹, Ю. С. Яковенко², В. С. Куликаускас³,
С. М. Барайшук², В. Г. Шепелевич⁴, И. С. Ташлыков²

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
Минск, Беларусь

²Белорусский государственный педагогический университет им. Максима Танка,
Минск, Беларусь

³Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына МГУ,
Москва, Россия

⁴Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Аннотация. В данной работе представлены результаты исследования влияния элементного состава, морфологии и микроструктуры на смачиваемость поверхностей быстрозатвердевших сплавов Al–In.

Ключевые слова: смачивание, элементный состав, морфология поверхности, микроструктура, сплавы Al–In.

Введение. В последние годы большое внимание уделяется исследованию и изготовлению гидрофобных материалов с микро-/нанорельефом поверхности. Такие материалы приобретают ряд уникальных свойств, среди которых повышенное водоотталкивание (супергидрофобность) и способность снижать гидродинамическое сопротивление течению жидкостей [1]. Показано, что на макроскопическом уровне подобный эффект приводит к появлению сильных водоотталкивающих свойств, «самоотчистке» поверхностей и заставляет жидкость катиться по наклонной поверхности под действием силы тяжести и при столкновении отскакивать от поверхности (а не растекаться по ней) [2]. Не менее важным представляется решение проблемы растекания жидкости по поверхности изделий, например по поверхности лобового стекла транспортных средств. Поэтому микроструктурированные материалы находят широкое применение в современной науке, технике, промышленных разработках (в том числе для защиты линий электропередач от обледенения и сопровождающего его обрыва провода).

Гидрофобизация играет ключевую роль в таких явлениях, как адгезия, смачивание и изучение явлений на границах раздела фаз и представляет собой актуальную задачу. Также стоит отметить, что гидрофобность – свойство, которое определяется не столько характеристиками материала в целом, сколько свойствами и структурой приповерхностных слоев, а следовательно, морфология поверхности играет исключительно важную роль в комплексе поверхностных свойств покрытий [1].

Для практического использования эффекта гидрофобности важно показать, как элементы топологии поверхности твердых тел изменяют поведение жидкости вблизи них. В связи с вышесказанным первостепенной задачей является создание рационального дизайна текстуры поверхности.

Благодаря технологии сверхбыстрой закалки (СБЗР) представляется возможным создать требуемую микротекстуру рельефа. Данные научных исследований показывают, что СБЗР обуславливает структурные изменения расплава, которые приводят к улучшению его физических и механических свойств [3].

На данный момент в литературе мало внимания уделено смачиванию быстрозакаленных (БЗ) алюминиевых материалов и выделению факторов, определяющих смачивание поверхностей БЗ-фольг. В силу большой доли производства алюминиевых изделий в промышленности и научному интересу к изучению поверхностных свойств микроструктурированных материалов, эти вопросы представляют как практический, так и теоретический интерес.

Методика эксперимента. При проведении эксперимента были исследованы БЗ-фольги сплавов алюминия с различным содержанием легирующего элемента – индия: Al – 0,35 ат.% In, Al – 0,7 ат.% In, Al – 1,4 ат.% In, Al – 4,7 ат.% In.

Для получения БЗ-образцов была использована технология центробежной закалки [3]. Равновесный краевой угол смачивания (РКУС) исследуемых поверхностей определен методом покоящейся капли [4]. Измерение РКУС проводили в двух случаях: на поверхности А фольг, контактирующей с цилиндром, и на поверхности Б, контактирующей с воздухом.

Для получения изображения топографии поверхности и определения ее шероховатости был использован атомно-силовой микроскоп (АСМ) NT-206. Изображения поверхностей получены в режиме двухпроходного сканирования (Two-pass scanning). Значение шероховатости определялось по данным, полученным с семи площадок, выбранных произвольным образом. Для обработки данных, полученных на АСМ, применялась программа SurfaceView.

Результаты эксперимента и их обсуждение. В таблице показаны экспериментальные результаты измерения краевых углов смачивания и шероховатости исследуемых поверхностей. Ниже обсуждаются полученные данные. Погрешность измерений оценивалась по методике, изложенной в работе [5]. Относительная погрешность измерений составила ~1 %.

Результаты измерения краевых углов смачивания и шероховатости поверхности для исследованных образцов

Поверхность анализа	Значение шероховатости поверхности, нм		РКУС, град.		Отношение полной площади выбранной области к ее проективной площади	
	А	Б	А	Б	А	Б
Al – 0,35 ат.% In	25,1	98,6	78,5	40,5	1,01	1,02
Al – 0,7 ат.% In	31,1	72,8	57,4	62,5	0,97	1,06
Al – 1,4 ат.% In	17,2	56,7	65,2	55,2	0,99	0,98
Al – 4,7 ат.% In	24,6	17,0	47,2	35,8	0,99	1,02

Роль шероховатости анализируемой поверхности образцов. Шероховатость является одной из основных геометрических характеристик качества поверхности деталей и оказывает влияние на эксплуатационные показатели. Шероховатость поверхности оценивается по неровностям профиля. Для отделения шероховатости поверхности от других неровностей с относительно большими шагами (отклонения формы и волнистости) ее рассматривают в пределах ограниченного участка. Для оценки значений шероховатости образцов были выбраны площадки размером 20×20 мкм. Полученные результаты указывают на то, что смачивание зависит от степени шероховатости поверхности. На рис. 1, который представляет собой 3D-изображения поверхностей исследованных образцов, видно, что рельеф поверхностей А и Б качественно различается. Такие различия в рельефе исследованных образцов объясняются отличием скорости кристаллизации для поверхностей А и Б (отвод тепла от поверхности А осуществляется интенсивнее, нежели от поверхности Б). В связи с этим оказывается, что поверхности одного и того же сплава имеют геометрические особенности рельефа, различную морфологию, а значит, и свойства, что принципиально важно в рамках промышленного использования [3].

Шероховатость поверхности оказывает влияние на характер смачивания образцов. Для гетерогенного режима смачивания РКУС определяется соотношением Касси – Бакстера [6]:

$$\cos \theta_{\text{ш}} = fR_{\delta} \cos \theta + f - 1, \quad (1)$$

где f – доля проекции смоченной площади на поверхность подложки с учетом частичного заполнения пор, R_{δ} – коэффициент шероховатости смоченной поверхности. В данной работе по причине малости высот выступов поверхности и расстояний между ними приняли $f \rightarrow 0$, в связи с чем, согласно (1), режим смачивания считали гомогенным и характер смачивания устанавливали согласно уравнению Венцеля – Дерягина:

$$\cos \theta_{\text{ш}} = \frac{S}{S_0} \cos \theta = R_{\delta} \cos \theta, \quad (2)$$

где θ и $\theta_{\text{ш}}$ – краевые углы на гладкой и шероховатой поверхности соответственно [6].

По результатам эксперимента получено, что поверхности А и Б рассматриваемых образцов проявили гидрофильные свойства.

Роль концентрации легирующего элемента. Исходя из данных, приведенных в таблице, и данных, полученных ранее для БЗ-фольг чистого алюминия [7], можно сделать вывод о том, что значение шероховатости и РКУС фольг сплавов Al–In зависит от концентрации легирующего элемента – индия.

Для поверхности А увеличение концентрации хрома приводит к незначительному изменению значения шероховатости поверхности. Для поверхности Б увеличение концентрации легирующего элемента приводит к уменьшению

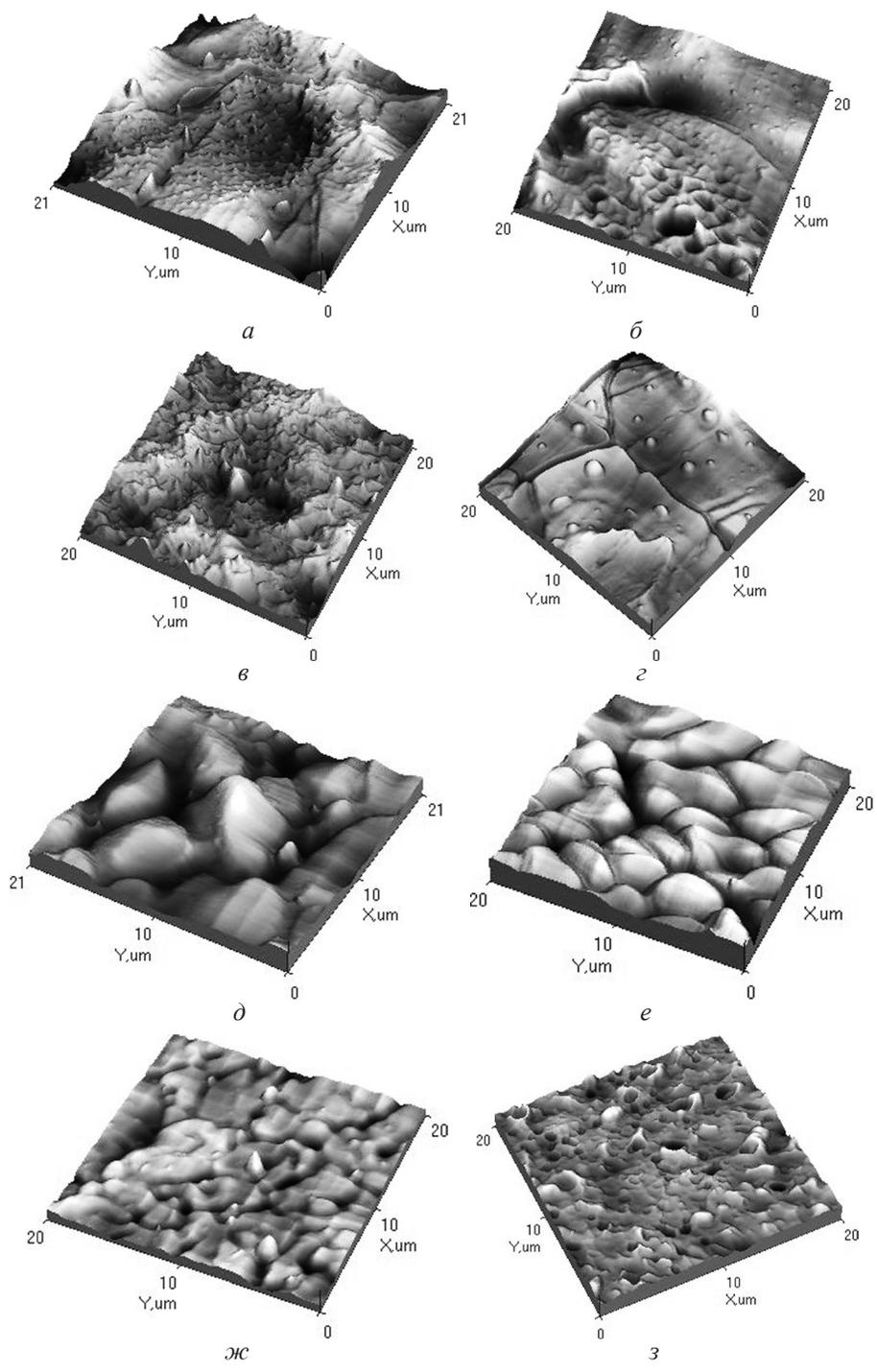


Рис. 1. 3D-АСМ-изображения рельефов поверхностей сплавов Al – 0,35 ат.% In, Al – 0,7 ат.% In, Al – 1,4 ат.% In, Al – 4,7 ат.% In; поверхности А (а, б, в, г), поверхности Б (д, е, ж, з) соответственно

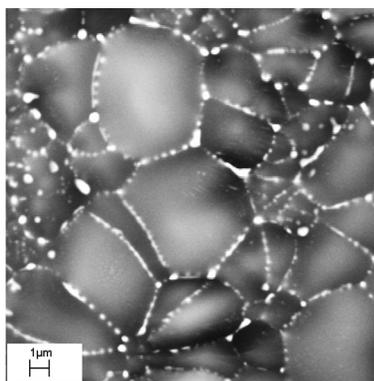


Рис. 2. Микроструктура БЗ-фольги сплава Al – 0,4 ат.% In [7]

величины шероховатости от 98,6 до 17,0 нм. Вариации в значениях шероховатости ведут к изменению РКУС поверхностей образцов.

В работе [7] было установлено, что послойный состав фольг изменяется с глубиной, и концентрация In на поверхности **кратно превышает его концентрацию в объеме**. Эффект максимальный при малых значениях индия в фольгах. Также на примере БЗ-фольги сплава Al – 0,4 ат.% In **получено, что микроструктура фольг, легированных индием, мелкоячеистая и характеризуется распределением легирующего элемента по границам зерен** рис. 2 [7].

Как известно, молекула воды биполярна: положительный заряд сконцентрирован в районе атомов водорода, а отрицательный – атомов кислорода. Следовательно, характер взаимодействия молекул воды с поверхностью определяется знаком электрических зарядов на поверхности образца. Если поверхность обогащена металлом, то молекулы ориентируются к ней своими электроотрицательными зарядами, т. е. атомами кислорода. При этом между молекулами воды возникают ван-дер-ваальсовы силы притяжения с малой энергией связи (4,18–8,37 кДж/моль). Если же на поверхности находятся электроотрицательные элементы (неметаллы, атомы кислорода), то молекула воды присоединяется к такой поверхности атомами водорода и формируются водородные связи, энергия которых значительно выше и составляет 29,9–33,49 кДж/моль. Поэтому такой элементный состав поверхности приводит к тому, что за счет водородных связей на поверхности образца формируется адсорбированная пленка воды, поверхностное натяжение на границе твердой и жидкой фаз уменьшается. В результате смачиваемость такой поверхности должна быть выше, чем у «металлической» поверхности, т. е. краевого угол смачивания наименьший [8].

Заключение. В данной работе было исследовано влияние на смачиваемость поверхностей БЗ-образцов Al – 0,35 ат.% In, Al – 0,7 ат.% In, Al – 1,4 ат.% In, Al – 4,7 ат.% In таких факторов, как элементный состав и морфология. По полученным в результате эксперимента данным установлено, что значение краевого угла смачивания зависит от концентрации легирующего элемента,

а также от поверхности анализа. Наблюдается зависимость смачиваемости и от шероховатости поверхности фольг. Значения краевого угла смачивания позволяют судить о свойствах поверхностей быстрозатвердевших фольг сплава Al–In. Все поверхности сплавов, легированных индием, проявили гидрофильные свойства, которые наиболее выраженными оказались у образца Al – 4,7 ат.% In.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о возможности управления гидрофобностью и гидрофильностью поверхности алюминиевых материалов, полученных сверхбыстрой закалкой, путем введения легирующих добавок в БЗ-сплавы алюминия. Также стоит отметить, что быстрозакаленные материалы могут стать своеобразной моделью для подбора оптимального рельефа с целью получения материала с **выраженными гидрофобными** (гидрофильными) свойствами.

Список использованных источников

1. *Беляев, А. В.* Гидродинамические и электрокинетические течения вблизи супергидрофобных поверхностей: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.07 / А. В. Беляев; Моск. гос. ун-т. – М., 2012. – 22 с.
2. *Boinovich, L. B.* Anti – icing potential of superhydrophobic coatings / L. B. Boinovich, A. M. Emelyanenko // *Mendelev Communications*. – 2013. – N 23. – P. 3–10.
3. *Мирошниченко, И. С.* Закалка из жидкого состояния / И. С. Мирошниченко. – М.: Металлургия, 1982. – 168 с.
4. *Ташлыков, И. С.* Элементный состав, топография и смачиваемость поверхности графита, модифицированного ионно-ассистированным осаждением покрытий / И. С. Ташлыков, С. М. Барайшук // *Изв. вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. – 2008. – № 1. – С. 30–35.
5. Аттестация алгоритмов и программ обработки данных при измерениях / Гос. система обеспечения единства измерений Рос. Федерации // Рекомендации МИ2955 [Электронный ресурс]. – 2005. – Режим доступа: <http://www.stepsdocs.ru>.
6. *Зимон, А. Д.* Адгезия жидкости и смачивание / А. Д. Зимон. – М.: Химия, 1994. – 413 с.
7. Элементный состав, морфология и смачиваемость поверхности фольг сплавов алюминия / И. И. Ташлыкова-Бушкевич [и др.] // Тез. докл. XLIV Междунар. Тулинов. конф. по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, Москва, 27–29 мая 2014 г. / под ред. проф. М. И. Панасюка. – М.: Унив. кн., 2014. – С. 116.
8. *Сажин, В. Б.* Иллюстрации к началам курса «Основы материаловедения» / В. Б. Сажин. – М.: Теис, 2005. – 78 с.