

Из данных графиков видно, что заметная часть огибающих волновых функций оказывается в области барьерного слоя (AlGaN). Так как подвижность электронов в барьерном слое в десятки раз хуже, в сравнении с канальным слоем (GaN), соответствующая доля электронов практически не будет участвовать в проводимости ДЭГ.

Результаты показывают неплохое соответствие построенной модели параметрам нитридных транзисторов, приведенным в литературных источниках, и могут быть использованы для проектирования нитридного гетеропереходного полевого транзистора на основе AlGaN и последующего его изготовления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электроника на основе нитрида галлия / пер. с англ. Р. Куэй ; под ред. А. Г. Васильева. – М. : Техносфера, 2011. – 592 с.
2. Modeling AlGaN p-i-n photodiodes / N. Vorsin [et al.] // Доклады БГУИР. – Т. 19, № 8. – 2021. – С. 50–57.
3. Моделирование и разработка AlGaN гетеропереходного полевого транзистора / Н. Н. Ворсин [и др.] // Вестник БрГТУ. – 2023. – № 1 (130). – С. 76–82.
4. Zine-eddine, T. Design and analysis of 10 nm T-gate enhance-ment-mode MOS-HEMT for high power microwave applications / T. Zine-eddine, H. Zahra, M. Zitouni // Journal of Science: Advanced Materials and Devices. – 2019. – Vol. 4, № 1. – P. 180–187.

МИКРОСТРУКТУРА СПЛАВА Al-7 МАСС. % ВІ ПРИ БЫСТРОЙ ЗАКАЛКЕ

В. И. Гладковский¹, А. И. Пинчук¹, В. Г. Шепелевич², В. М. Шилько²

¹Учреждение образования «Брестский государственный технический университет», г. Брест, Республика Беларусь

²Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь

Как известно, метод быстрой закалки из расплава заключается в охлаждении струи жидкого металла на внешней (закалка на диске) или внутренней (центробежная закалка) поверхностях вращающихся барабанов или в прокатке расплава между холодными валками, изготовленными из материалов с высокой теплопроводностью.

Сплавы алюминия, содержащие индий, свинец и висмут (Al-In, Al-Pb и Al-Bi), изучены недостаточно, что вызвано их ограниченным применением в промышленности. Однако в последние два десятилетия несколько групп исследователей проявили к ним научный интерес, обусловленный перспективами их практического использования [1–4]. Механические и эксплуатационные характеристики определяются как химическим составом, так и размером, морфоло-

Современные научные исследования в области физико-математических и технических дисциплин

гией и распределением фаз, а также условиями эксплуатации. Структурные дефекты (дислокации, границы зерен, дефекты упаковки и др.) также влияют на их механические и электрохимические свойства. Установлено, что сплавы алюминия и висмута могут быть использованы в качестве анодных материалов при защите металлов, например железа и сталей от коррозии, что имеет важное практическое значение в разных отраслях промышленности, строительстве и транспорте. Экспериментально выявлено, что сплавы системы алюминий – висмут при определенных условиях взаимодействуют с водой, вызывая выделение тепла и водорода, что имеет важное практическое значение для развития водородной энергетики. Установлено, что свойства таких сплавов зависят от температуры и давления, а также от химического состава сплава и его микроструктуры, формируемой при кристаллизации и термической обработке [5–6]. Это обусловило проведения нами ряда исследований микроструктуры сплава Al-7 масс. % Вi полученных методом быстрой закалки.

Сплав Al-7 масс. % Вi получен путем сплавления алюминиевых трубок и висмута чистотой 99,999 % при температуре 750 °С. Затем расплав заливался при комнатной температуре в графитовую изложницу, где и закристаллизовывался в виде слитка с поперечным сечением $6 \times 6 \text{ мм}^2$ и длиной 7 см. Средняя скорость охлаждения расплава составляла $\sim 10 \text{ К/с}$. Из средней части слитков вырезались образцы для исследования микроструктуры. Исследования микроструктуры сплава проводились с помощью растрового электронного микроскопа LEO-1455-VP. Микроскоп имеет приставку для проведения рентгеноспектрального микроанализа. Рабочее напряжение электронного микроскопа 20 кВ. Поверхность шлифа полировалась специальной пастой, содержащей дисперсные твердые частицы абразивного вещества. Определение параметров микроструктуры (средней хорды зерен алюминия и выделений висмута, удельной поверхности межзеренных границ алюминия и межфазной границы алюминия и висмута) осуществлялось с помощью стереометрического анализа измерений, полученных методом случайных секущих [7]. Относительная погрешность измерения параметров микроструктуры составила 8–15 %.

Изображения шлифа исследуемого сплава Al-7 масс. % Вi при различных увеличениях представлены на рисунке 1 (а, б). При больших увеличениях (рисунк 1б) наблюдаются темный фон, белые и серые выделения. Темный фон соответствует алюминию. Белые выделения, как показал рентгеноспектральный микроанализ, соответствуют висмуту. Границы зерен алюминия декорируются светлыми выделениями других фаз. Средняя хорда сечений алюминиевых зерен равна $d_A = 25 \text{ мкм}$, рассчитанный средний размер зерен алюминия $D = 40 \text{ мкм}$. Удельная поверхность границ зерен алюминия равна $S_A = 0,12 \text{ мкм}^{-1}$. Большинство частиц висмута имеют шарообразную форму. Среднее значение диаметров их сечений равно $d_B = 1,5 \text{ мкм}$. Удельная поверхность межфазной границы алюминий-висмут составляет $S_{A-B} = 0,062 \text{ мкм}^{-1}$, что в два раза меньше S_A .

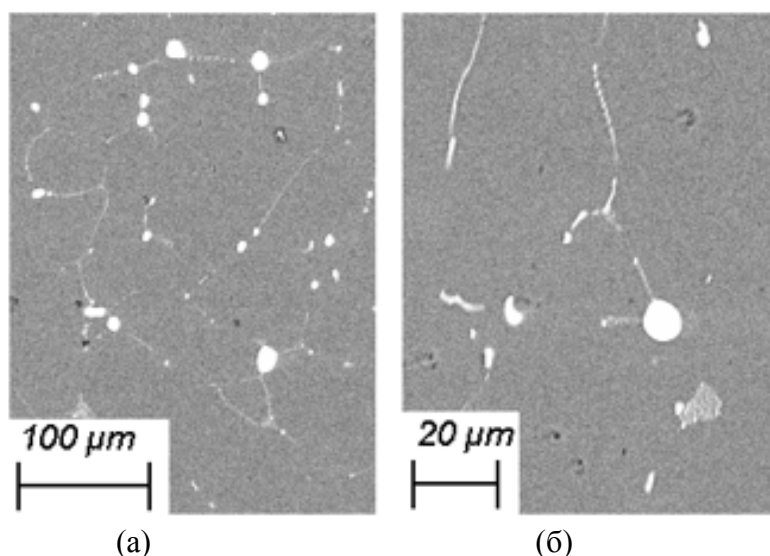


Рисунок 1 – Выделения фаз висмута и железа на границах зерен алюминия (а) и (б) сплава Al-7 масс. % Вi при различных увеличениях

Выделения, имеющие серый оттенок и полосатую структуру в области их скопления, содержат железо. В этих областях, как следует из распределения (рисунок 2), средняя концентрация железа достигает 10 масс. %. Распределение кремния характеризуется незначительными пиками (величиной до 2 масс. %), находящимися на расстоянии ~ 1 мкм друг от друга, что свидетельствует о более однородном распределении выделений кремния, чем распределения выделений висмута и железа в исследуемом сплаве Al-7 масс. % Вi после кристаллизации при скорости охлаждения 10 К/с.

Распределение длин хорд случайных секущих на выделениях висмута по размерным группам приведено на рисунке 2. Общее количество изображений выделений висмута, используемых при построении гистограммы, составляло не менее 150. Наибольшая доля (0,27) хорд приходится на группу с минимальным размером 0,5 мкм. С увеличением длины хорд на сечениях висмута их доля уменьшается. Доля хорд группы с максимальной их длиной (4 мкм) равна 0,05. Расстояния между выделениями висмута достигают 2 мкм и более.

Образование неоднородной структуры в массивном сплаве Al(Fe,Si)-7 масс. % Вi обусловлено особенностями диаграммы состояния системы Al-Vi [8, 9]. Взаимная растворимость компонентов в твердом состоянии составляет величину менее 1 масс. %. В сплавах системы имеет место расслоение жидкой фазы L на две жидкости L_1 и L_2 , отличающихся составом, при нагреве выше 657 °С. Объемная доля жидкости L_1 значительно больше объемной доли жидкости L_2 . При охлаждении расплава ниже 657 °С сначала происходит монотектическое превращение жидкости L_1 . При этом сначала выделяется алюминий, а атомы висмута и железа оттесняются к границам алюминиевых зерен. Жидкость L_2 , богатая висмутом, при дальнейшем охлаждении ниже 270 °С испытывает эвтектическое превращение, при котором выделяются висмут и алюминий. Выделения висмута являются более крупными, предпочтительно располагаются в областях, расположенных на стыках трех зерен. Выделяемый алюминий

присоединяется к зернам алюминия, которые образовались ранее при монотектическом превращении. Выделения железа, а также их скопления, преимущественно располагаются на границах зерен алюминия. Наблюдаются скопления дисперсных выделений висмута и железа, расположенных на границах зерен.

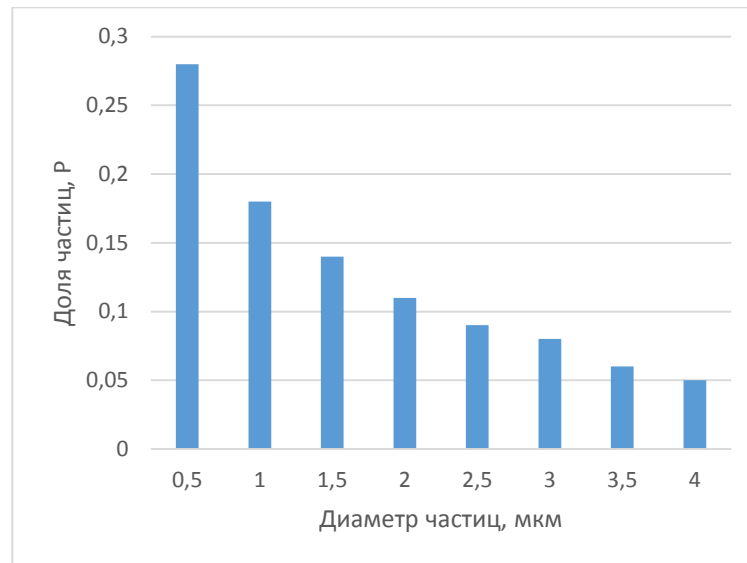


Рисунок 2 – Распределение длин хорд сечений висмутовых частиц сплава Al-7 масс. % Bi по размерным группам

Кристаллизация сплава Al-7 масс. % Bi, изготовленного на основе алюминиевого лома, в котором концентрация железа и кремния $\approx 0,3$ масс. %, при средней скорости охлаждения ~ 10 К/с, приводит к формированию микрокристаллической структуры. Средняя хорда сечений алюминиевых зерен равна $d_{Al} = 25$ мкм, средний размер зерен алюминия 40 мкм. Удельная поверхность границ зерен алюминия равна $S_{Al} = 0,12$ мкм⁻¹. На границах зерен локализованы преимущественно дисперсные выделения висмута и железа.

Распределение кремния в сплаве более однородно по сравнению с распределением выделений железа и висмута. Среднее значение диаметров частиц висмута равно $d_{Bi} = 0,5$ мкм. Удельная поверхность межфазной границы алюминий – висмут равна $S_{Al-Bi} = 0,062$ мкм⁻¹.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авраамов, Ю. С. Сплавы на основе систем с ограниченной растворимостью в жидком состоянии (теория, технология, структура, свойства) / Ю. С. Авраамов, А. Д. Шляпин. – М. : Интерконтакт науки, 2002. – 371 с.
2. Surface, interface and phase transitions in Al-In monotectic alloys / I. Kaban [et al.]. – Acta Mater, 2010. – V. 58. – P. 3406–3414.
3. Козин, Л. Ф. Водородная энергетика и экология / Л. Ф. Козин, С. В. Волков. – Киев : Наукова Думка. – 2020. – 396 с.
4. Кинетика и механизм коррозионного растрескивания алюминия / Л. Ф. Козин [и др.] // Украинский химический журнал. – 2009. – Т. 75. – № 11. – С. 3–11.

5. Кинетика и механизм взаимодействия с водой алюминия и магния тройной системы Al-Mg-Bi / Л. Ф. Козин [и др.] // Физико-химия поверхности материалов. – 2011. – Т. 47. – С. 144–153.

6. Шепелевич, В. Г. Структура быстрозатвердевших сплавов Al-(0,25–2,0) масс. % Bi / В. Г. Шепелевич // Физика и химия обработки материалов. – 2022. – № 4. – С. 32–36.

7. Салтыков, С. А. Стереометрическая металлография / С. А. Салтыков. – М. : Металлургия, 1976. – 272 с.

8. Диаграммы состояния двойных металлических систем. в 3 т. / под общ. ред. Н. П. Лякишева. – М. : Машиностроение, 1996. – Т. 1. – 992 с.

9. Новиков, И. И. Теория термической обработки металлов / И. И. Новиков. – М. : Металлургия, 1978. – 390 с.

МИКРОТВЕРДОСТЬ СПЛАВА Al-7 МАСС.% BI ПРИ СПИННИНГОВАНИИ

В. И. Гладковский¹, А. И. Пинчук¹, В. Г. Шепелевич², В. М. Шилько²

¹Учреждение образования «Брестский государственный технический университет», г. Брест, Республика Беларусь

²Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь

Спиннингование, то есть получение тонких лент аморфных металлических сплавов с помощью быстрого (со скоростью не менее 10^6 К/с) охлаждения расплава на поверхности вращающегося диска или барабана, отработано достаточно хорошо. Наиболее типичными способами получения аморфных лент и проволок методом быстрого охлаждения являются: а) закалка на вращающемся барабане; б) экстракция расплава вращающимся барабаном; в) охлаждение тонкой струи расплава. Далее аморфные лента и проволоки отжигются при контролируемой температуре для кристаллизации. Для создания нанокристаллической структуры отжиг проводится так, чтобы возникало большое число центров кристаллизации, а скорость роста кристаллов была низкой [1–5].

В последние десятилетия наблюдается существенный прогресс в развитии технологий по использованию водорода в различных областях деятельности человечества, например, в медицине, автомобильном транспорте и др. Известно, что сплавы системы алюминий – висмут при определенных условиях взаимодействуют с водой, вызывая выделение тепла и водорода. Для уменьшения стоимости получения водорода предполагается использовать алюминиевый лом (например, алюминиевые трубки из отработавших свой эксплуатационный срок холодильных установок, алюминиевый провод из выработавших свой ресурс линий электропередач, вышедшая из употребления алюминиевая посуда, отслужившие свой срок конструкционные алюминиевые изделия и др.) вместо алюминия, получаемого при помощи дорогостоящего электролиза [6–10]. Концентрация кремния и железа в алюминиевой трубке составляет $\approx 0,3$ масс. %.