

также увеличивается и максимальное значение наблюдается вблизи стокового перехода, где электроны в канале при своем дрейфе приобретают самую большую энергию. И, в-четвертых, распределения вдоль канала плотности паразитного туннельного тока и средней подвижности электронов демон-стрируют обратную зависимость – увеличение плотности тока сопровождается уменьшением величины подвижности.

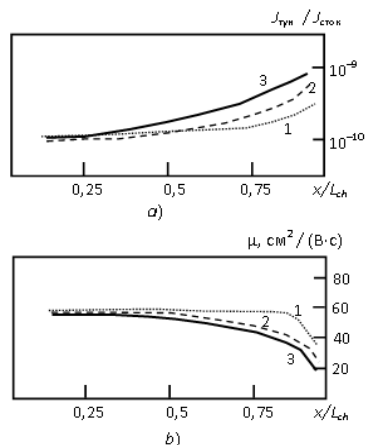


Рисунок 3 – Распределения вдоль канала МОП-транзистора средних значений отношения туннельного тока на плавающий затвор к току стока (а) и подвижности электронов в канале (б)

Таким образом, в настоящей работе с помощью численного моделирования методом Монте-Карло проанализировано влияние стокового напряжения в элементах флеш-памяти при считывании информации на распределения вдоль проводящего канала относительной величины паразитного туннельного тока, а также средних значений подвижности электронов при возникновении данных паразитных токов.

Литература

1. Baik S.J., Choi S., Chung U-In, Moon J.T. Engineering on tunnel barrier and dot surface in Si nanocrystal memories // Solid-State Electron. – 2004. – Vol. 48. – P. 1475–1481.
2. Fiegna C., Iwai H., Wada T., Saito M., Sangiorgi E., and Ricco B. Scaling the MOS Transistor Below 0.1 μm: Methodology, Device Structures, and Technology Requirements // IEEE Trans. Electron Dev. – 1994. – Vol. 41. – No 6. – P. 941–951.
3. Борздов В.М., Жевняк О.Г., Комаров Ф.Ф., Галенчик В.О. Моделирование методом Монте-Карло приборных структур интегральной электроники – Минск: БГУ, 2007. – 175 с.
4. Zhevnyak O. Temperature effect on electron transport in conventional short channel MOSFETs: Monte Carlo simulation // Proc. SPIE. – 2008. – Vol. 7025. – P. 1M-1–8.
5. Жевняк О.Г. Моделирование туннельного тока в элементах флеш-памяти // Международный научно-исследовательский журнал, 2015. – Вып. 9., Ч.3. – С. 49–53.

УДК 539.216; 539.22

ВЛИЯНИЕ МЕДИ НА МИКРОСТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СИЛУМИНОВ Гусакова О.В.¹, Шепелевич В.Г.², Александров Д.В.³, Стародумов И.О.³

¹Международный государственный экологический институт имени А.Д. Сахарова БГУ
Минск, Республика Беларусь

²Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь

³Уральский федеральный университет
Екатеринбург, Российская Федерация

Силумины находят широкое применение в различных отраслях промышленности: электротехнике, металлургии, машиностроении, медицине, пищевой и военной промышленности и т. д. Исследования и технологические разработки, направлены в основном на повышение прочности и пластичности сплавов системы Al-Si за счет уменьшения размеров частиц кремния. При этом изучается возможность направленного изменения микроструктуры и улучшения механических свойств за счет легирования и увеличения скорости затвердевания [1, 2].

Наиболее технологичным и ресурсосберегающим методом высокоскоростного затвердевания, является метод сверхбыстрой закалки из расплава. В этом методе фольга получается в результате затвердевания тонкого слоя расплава после его растекания по поверхности вращающегося кристаллизатора. В зависимости от толщины слоя

расплава скорость его охлаждения составляет 10^5 – 10^7 К/с. Исследованы микроструктура и механические свойства фольги эвтектического сплава АК12оч (Al–12 ат.% Si–0.2 ат. % Fe) и заэвтектического силумина Al–17 ат.% Si–0.2 ат. % Fe легированных медью до 2,5 ат. %.

Вид микроструктуры в поперечном сечении фольги сплава АК12оч–1,1 ат. % Cu представлен на рисунке 1(а и б).

В слое у стороны, прилегающей к кристаллизатору (А), наблюдается участок толщиной в несколько микрон, в котором заметные выделения отсутствуют (рис.1б). Карты распределения Si и Cu (рис.1 в и г), показывают, что кремний и медь в слое у кристаллизатора расположен однородно, При удалении от кристаллизатора образуются дендриты алюминия, Si находится в междендритном пространстве а медь оттесняется к границам дендритов.

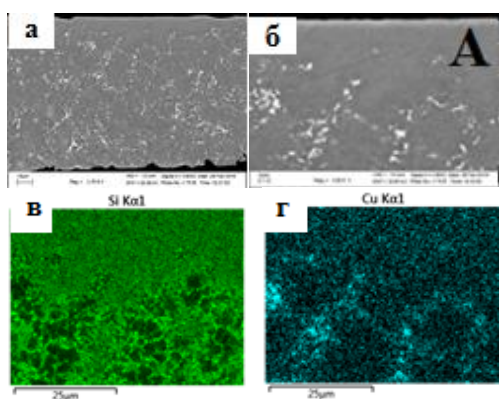


Рисунок 1 – Микроструктуры фольги сплава Al – 12 ат. % Si – 0.2 ат. % Fe – 1,1 ат. % Cu и карта распределения элементов в слое, прилегающем к кристаллизатору

Соединения на основе железа, меди и кремния образуют тонкую прослойку по границе эвтектического зерна (рис.2).

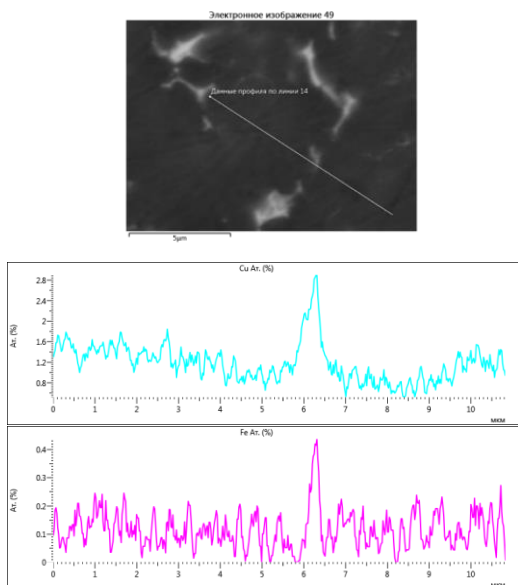


Рисунок 2 – Микроструктура и распределение Cu и Fe вдоль линии сканирования в поперечном сечении эвтектического зерна

Согласно равновесной диаграмме состояния при температуре эвтектики растворимость Cu в Al составляет 2,5 ат. %, а с понижением температуры уменьшается. Однако одним из основных проявлений высокоскоростной кристаллизации является повышение растворимости сверх равновесной. В связи с этим исследованы микроструктуры эвтектических и заэвтектических силуминов легированных медью до 2,5 ат.%. Характер формирования микроструктуры не изменяется при увеличении концентрации меди до 2,5 ат. %.

В заэвтектических силуминах в фольгах толщиной более 80 мкм формируется трехслойная структура, как показано на рисунке 3. В слое

(A) заметно образование выделений меди, толщиной не более 50 нм, по границам зерен алюминия. В среднем слое (C) наблюдается формирование мелких вытянутых зерен, в центре которых располагаются первичные кристаллы кремния, размер которых не превышает 1 мкм. В слое (B) размер зерен алюминия и толщина слоя фазы Cu-Fe увеличиваются, что является результатом уменьшения переохлаждения и скорости затвердевания.

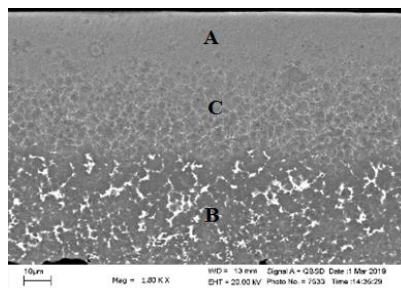


Рисунок 3 – Микроструктура и распределение элементов в фольгах сплава Al – 17 ат. % Si – 0,2 ат. % Fe – 2,5 ат. % Cu

На основе выше изложенных результатов предложена модель формирования слоистой микроструктуры быстрозатвердевших фольг силуминов, учитывающая изменения условий затвердевания по толщине, объясняющая экспериментально установленное постоянство состава по толщине фольги и механизм образования наноразмерных включений соединений на основе меди.

Легирование быстрозатвердевшей фольги эвтектических и заэвтектических силуминов медью до 2 ат.% обеспечивает повышение микротвердости в 1,2 и 1,4 раза, соответственно (рис. 4).

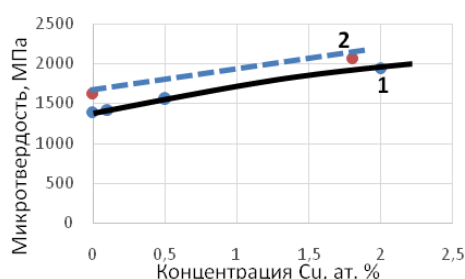


Рисунок 4 – Зависимость микротвердости эвтектических (1) и заэвтектических (2) силуминов от концентрации меди

Важным параметром при изучении эксплуатационных характеристик материалов являются их трибологические свойства, которые включают в себя значение коэффициента трения. Трибологические испытания проводились при возвратно-поступательном движении индентора, изготовленного из твердого сплава ВК8, при скорости его движения 2 мм/с в условиях сухого трения.

Нагрузка на индентор составляла 0,2 Н, длина трека 5 мм. Глубина сформированного трека износа на поверхности образцов измерялась профилометром и составила ~ 2 мкм при пути трения 10 м.

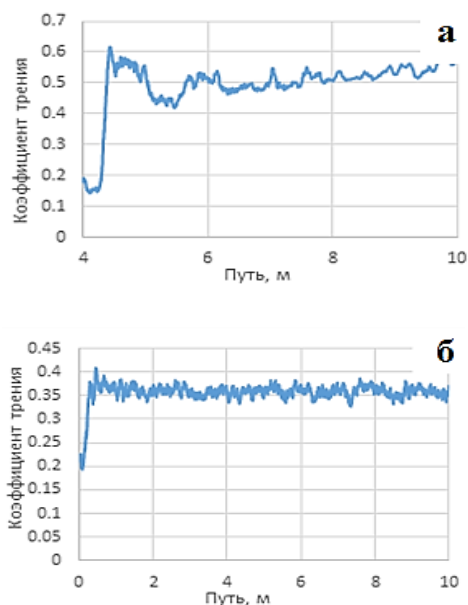


Рисунок – 5 Зависимость коэффициента трения от пути трения массивных сплавов (а) и быстрозатвердевшей фольги (б)

На рисунке 5 приведены изменения коэффициента трения в процессе испытаний для массивных образцов, полученных при скорости охлаждения 10^2 К/с, и быстрозатвердевшей фольги. Показано, что коэффициент трения в фольге ниже и имеет постоянное по глубине значение, что обусловлено дисперсностью микроструктуры.

Таким образом, легирование медью эвтектических и заэвтектических силуминов, полученных при высокоскоростном затвердевании, увеличивает значение микротвердости и понижает коэффициент трения, что может быть обусловлено образованием ультрадисперстных частиц сигма фазы, образовавшихся после распада пересыщенного медью твердого раствора на основе алюминия.

Благодарности. Работа выполнена в рамках проекта № Ф18Р-195 Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований и проекта № 18-58-00034 Российского фонда фундаментальных исследований.

Литература

1. Модифицирование силуминов мелкокристаллическими алюминиевыми сплавами / В.Ю. Стеценко, А.И. Ривкин, А.П. Гутев, Р.В. Коновалов // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. – № 1. – 2009. – С. 21–24.
2. Волочко, А.Т. Модифицирование эвтектических и первичных частиц кремния в силуминах. Перспективы развития / А.Т. Волочко // Литье и металлургия. 2015. – 4(81). – С. 38–44.

УДК 538.9:669.2

ТЕРМИЧЕСКИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БЫСРОЗАТВЕРДЕВШИХ ОКОЛОЭВТЕКТИЧЕСКИХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Al-Ge

Гусакова О.В.¹, Шуля Ю.М.¹, Скибинская А.Н.¹, Беляй Л.В.²

¹Международный государственный экологический институт имени А.Д. Сахарова БГУ,

Минск, Республика Беларусь,

²Белорусский государственный университет

Минск, Республика Беларусь

На данный момент эвтектические и околоэвтектические сплавы системы Al-Ge нашли широкое применение в электронной промышленности в качестве высокотемпературных припоев [1]. В то же время данные сплавы, полученные традиционными методами, отличаются неоднородной микроструктурой и, как результат, неудовлетворительными физико-техническими свойствами. Для полного расплавления материала, полученного традиционными способами требуется перегрев выше температуры эвтектики на 7–15 градусов. Переход к высоким температурам увеличивает текучесть сплава и может привести к избыточному потоку в нежелательные области в соединении. Кроме того, если расплавление будет протекать не равномерно то распределение температуры не будет однородным и вязкость расплава будет меняться. Некоторые области соединения могут быть твердые и другие жидкие, что при-

ведет к неоднородной структуре при затвердевании. Поэтому актуальным является разработка методов получения материала с узким интервалом плавления. К таким методам относятся сверхбыстрая закалка из расплава.

Структура материалов, получаемых при сверхвысоких скоростях охлаждения расплава, существенно отличается от структуры материалов, изготовленных традиционными технологиями. Дисперсность и однородность микроструктуры материалов, получаемых высокоскоростным затвердеванием, может приводить как к сужению температурного интервала плавления [2] так и к изменению температуры плавления сплавов, в том числе смещению эвтектической точки. В связи с этим исследование физических свойств сплавов системы Al-Ge около эвтектического составов полученных методом сверхбыстрой закалки из расплава является актуальным.