

МИКРОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ
БЫСТРОЗАТВЕРДЕВШИХ ФОЛЫГ СПЛАВА Al–Mg–Cu–Mn–Fe
Столяр И.А.¹, Ташлыкова-Бушкевич И.И.², Шепелевич В.Г.¹, Wu R.³

¹УО «Белорусский государственный университет»,
220050, Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, д. 4
E-mail: uyluana@gmail.com

²УО «Белорусский государственный университет информатики
и радиоэлектроники»,

220013, Беларусь, г. Минск, ул. П. Бровки, д. 6

³Harbin engineering university, 150001, PR China, Harbin,
Nangang District, Nantong Str. 145

Повышенный уровень механических свойств, коррозионной стойкости, прочности и пластичности быстрозатвердевших (БЗ) сплавов алюминия обусловлен высокой дисперсностью структурно-фазовых составляющих. Например, выделение высокодисперсных интерметаллидных частиц в сплавах, содержащих переходные металлы, повышает ресурсные характеристики алюминиевых материалов [1]. Поэтому для повышения прочности в сочетании с высокой коррозионной стойкостью сплавы комплексно легируют, используя сразу несколько переходных металлов. Важным критерием выбора легирующих элементов является коэффициент диффузии компонентов в расплаве при кристаллизации и в твердом металле при температурах компактирования, чтобы сохранить структурно-фазовое состояние БЗ материалов, которое тем более стабильно, чем ниже диффузионная подвижность легирующих элементов.

Как известно, одной из самых перспективных при разработке свариваемых сплавов алюминия является система Al–Mg [2]. Повышение прочности сплавов достигается применением тройной системы Al–Mg–Cu путем совместного легирования алюминия медью (3–5 мас. %) и магнием (0,5–2 мас. %). Сплавы системы Al–Mg–Cu впервые начали применяться в качестве алюминиевых сплавов в силовых конструкциях. Сейчас их широко используют в различных областях техники, в том числе ракетно-

космической, при комнатной и повышенных температурах. Эта система является основой так называемых дюралюминов, которые наряду со сравнительно высокими значениями прочностных характеристик обладают хорошей пластичностью, в том числе высокой технологичностью.

Целью данной работы является исследование микроструктуры и элементного состава фольг промышленного сплава Al–Mg–Cu–Mn–Fe (1191), полученных высокоскоростной кристаллизацией.

Исследуемые фольги промышленного сплава 1191 Al-2,76% Mg-3,52% Cu-0,77% Mn-0,3% Fe (мас.%) (Al-3,17% Mg-1,55% Cu-0,39% Mn-0,15% Fe (ат.%) были получены сверхбыстрой закалкой из жидкой фазы методом одностороннего охлаждения – центробежной закалкой. Кристаллизация фольг осуществлялась на внутренней поверхности медного цилиндра диаметром 20 см, вращающегося с частотой 1500 об/мин. Марочный состав сплава 1191, где указано содержание легирующих элементов и примесей, приведен в таблице 1. Для определения элементного состава и распределение компонент использовался растровый электронный микроскоп (РЭМ) LEO – 1455 VP с рентгеновским микроанализатором HKL EBSD Premium System Channel 5 фирмы Carl Zeiss (Германия-Великобритания). Измерения проводились при ускоряющем напряжении 20 кВ.

Таблица 1

Марочный состав по ТУ промышленного сплава 1191 [3]

Массовая доля элементов, %								
Mn	Si	Fe	Cu	Ti	Zn	Zr	Mg	Be
0,35-0,8	≤0,2	≤0,3	3,8-4,5	0,03-0,1	≤0,1	0,07-0,2	2,3-2,7	0,0002-0,005

Обнаружено, что микроструктура фольг сплава Al–Mg–Cu–Mn–Fe является неоднородной по толщине. Общий вид поперечного сечения фольги показан на рисунке 1а. Дополнительно на рисунке 1б изображены следующие слои: слои А и Б, прилегающие к стороне, контактирующей с барабаном, и стороне, контактирующей с воздухом, соответственно. Слой С располагается в центральной части поперечного сечения фольги.

В объеме фольг обнаружено, что расположение медьсодержащих выделений имеет преимущественно междендритный характер. Строчки и единичные выделения алюминидов декорируют ветви дендритов. Микроструктура слоев состоит из дисперсных дендритов пересыщенного α -твердого раствора. Гетерогенная микроструктура слоя А содержит наноразмерные медьсодержащие включения. Результаты рентгеноспектрального микроанализа, полученные при сканировании вдоль линии в слое С, подтвердили, что светлые области обогащены медью. В светлых участках содержание меди достигает 10 мас.% (6 ат.%). Концентрация магния в соответствующих областях составляет около 3 мас.% (2 ат. %).

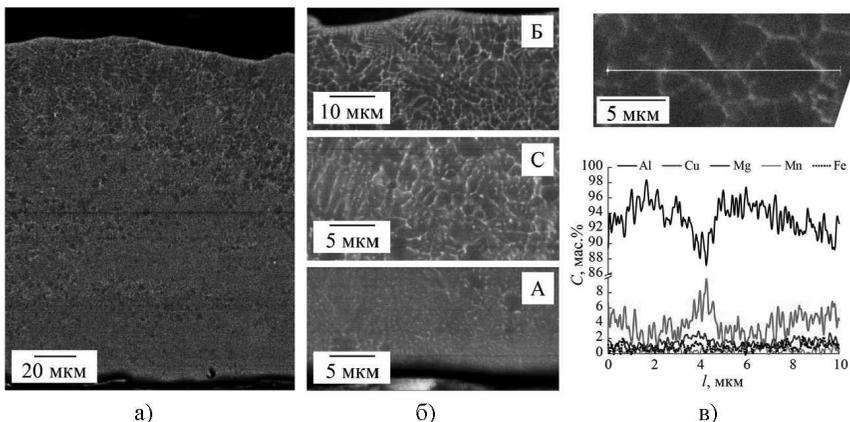


Рисунок 1 – Микроструктура поперечного сечения БЗ фольг сплава 1191: *а* – РЭМ-изображение поперечного сечения, *б* – РЭМ-изображение слоистой кристаллической структуры в приповерхностной области (А, Б) и на глубине (С) фольг, *в* – РЭМ-изображение слоя С и распределение химических элементов Al, Cu, Mg, Mn, Fe вдоль заданной линии сканирования

Сравнительный анализ изменения химического состава по толщине фольги по данным о содержании элементов, полученных для участков противоположных сторон образца, а также в поперечном сечении, на рисунке 2 показал, что различие между концентрациями таких компонентов как медь, магний и железо на обеих сторонах составляет в среднем 25%. В случае марганца различие между концентрациями на

противоположных сторонах фольги не превышает 10%. Следовательно, при высокоскоростной кристаллизации на контактной поверхности А фольги образуется приповерхностный слой, обогащенный основными легирующими элементами. Поведение меди, магния и железа указывает на то, что они являются сегрегационно наиболее активными легирующими элементами в сплаве 1191.

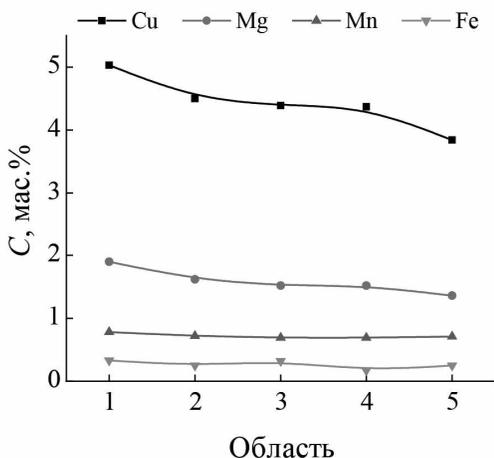


Рисунок 2 – Элементный состав слоистой структуры поперечного сечения БЗ фольг сплава 1191, где
 1 – поверхность А,
 2 – слой, прилегающий к стороне А, 3 – слой в средней части фольги,
 4 – слой, прилегающий к стороне Б, 5 – поверхность Б

Анализируя причины изменения содержания основных легирующих элементов – меди и магния – по толщине фольг необходимо учитывать влияние повышенной концентрации вакансий на обогащение поверхности фольг алюминия легирующими элементами после высокоскоростной кристаллизации. Сегрегация меди, как получено, наблюдается не только на границах ячеек, но и на поверхности фольг. Данный эффект поверхностной сегрегации, по-видимому, вызван действием поверхности фольг и границ зерен как стоков для комплексов закалочные вакансии-атомы растворенных элементов [4, 5] и наблюдался ранее в БЗ бинарных сплавах алюминия [6, 7]. При этом вблизи закалочного барабана, т.е. поверхность А, где скорость кристаллизации достигает наибольших значений, степень обогащения легирующими элементами, как правило, выше. В свою очередь наблюдаемое расхождение измеренных значений концентраций

магния на поверхности фольг и расчетного содержания в сплаве может быть в том числе обусловлено участием магния в образовании оксидной пленки.

В результате выполненных исследований установлена слоистая структура поперечного сечения фольг сплава 1191. Микроструктура слоя фольги, прилегающего к барабану, характеризуется наличием наноразмерных включений алюминида меди. Микроструктура следующих слоев состоит из дисперсных дендритов пересыщенного -твердого раствора. Выделения алюминидов декорируют ветви дендритов. Наиболее сегрегационно активными легирующими элементами являются Cu, Mg и Fe. Их содержание вблизи поверхности А на 25% выше, чем вблизи противоположной стороны Б.

Литература

1. Pinomaa T., Laukkanen A., Provatas N. Solute trapping in rapid solidification // MRS Bulletin. - 2020. Т. 45. №. 11. - С. 910-915.
2. 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.
3. AUREMO. <https://auremo.org/materials/splav-d24-vad1-1191.html>
4. Hirose S., Sato T., Kamio A., Flower H. M. Classification of the role of microalloying elements in phase decomposition of Al based alloys // Acta Materialia. - 2000. V. 48. №. 8. - С. 1797-1806.
5. Löchte L., Gitt A., Gottstein G., Hurtado I. Simulation of the evolution of GP zones in Al-Cu alloys: an extended Cahn-Hilliard approach // Acta materialia. - 2000. Т. 48. №. 11. - С. 2969-2984.
6. Tashlykova-Bushkevich I. I., Shepelevich V. G. Dope depth distribution in rapidly solidified Al-Ge and Al-Me (Me= Fe, Cu, Sb) alloys // Journal of alloys and compounds. - 2000. V. 299. №. 1-2. - P. 205-207.
7. Tashlykova-Bushkevich I., Itoh G. Effect of rapid solidification on microstructural features of Al-Cr alloys // Mater. Sci. Forum. - 2012. V. 706-709. - P. 301-304.