

2. Арсенид-галлиевые операционные усилители с умножителями крутизны входных дифференциальных каскадов / Н. Н. Прокопенко [и др.] // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем – 2022: сб. тр. / под общ. ред. акад. РАН А. Л. Стемпковского. – М.: ИППМ РАН, 2022. – Вып. 3. – С. 163–169.

3. GaN transistor based Bi-directional DC-DC converter for stationary energy storage device for 400V DC microgrid / F. Xue [et al.] // 2015 IEEE First International Conference on DC Microgrids (ICDCM), Atlanta, GA, USA, 7–10 June. 2015. – Atlanta, 2015. – P. 153g–153l.

4. Zanoni, E. Reliability Physics of GaN HEMT Microwave Devices: The Age of Scaling / E. Zanoni // 2020 IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS), Dallas, TX, USA, 28 April – 30 May, 2020. – Dallas, 2020. – P. 1–10.

А. С. ОЛЕНЦЕВИЧ

МЕХАНОСИНТЕЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННЫХ ПОРОШКОВ СИСТЕМЫ Al–Si–Mg

Белорусско-Российский университет, Могилев, Беларусь

E-mail: capsloock3333@mail.ru

Введение. В современной промышленности разработка новых конструкционных материалов, отличающихся улучшенным комплексом свойств, является одной из приоритетных задач. Во многих отраслях ключевое место отводится композиционным материалам, среди которых наиболее перспективными являются дисперсно-упрочненные, что обусловлено их высокой прочностью и жаропрочностью. Такие материалы востребованы во многих областях, включая и новую для нашей промышленности область аддитивных технологий. Перспективным способом получения таких материалов является реакционное механическое легирование [1].

Среди материалов, применяемых для послойного синтеза, большой интерес вызывают сплавы на основе алюминия, при этом в большинстве случаев используют силумины (система алюминий–кремний) [2]. Их основной недостаток – пониженная прочность получаемых изделий, что обусловлено формированием крупнозернистой структуры и химической неоднородностью материала. Использование порошков, синтезированных способом механического легирования, является эффективным методом улучшения структуры изделий, что объясняется наличием тугоплавких частиц ультрадисперсного размера, одновременно выступающих в роли упрочняющей фазы и играющих роль центров кристаллизации в процессе затвердевания матрицы.

Цель настоящего исследования – изучение возможности получения алюминиевых порошков для послойного синтеза с применением способа реакционного механического легирования.

Материалы и методы. Механосинтез порошков осуществлялся в лабораторной шаровой мельнице гирационного типа. В качестве исходных компо-

нентов использовались стандартные порошки, выпускаемые промышленностью: порошок алюминия ПА-4, порошки кремния и магния марки «Ч». В качестве базовой атмосферы в рабочих камерах был выбран воздух.

При проведении экспериментов применялись стандартные методики и оборудование. Гранулометрический состав порошков изучали методом ситового анализа. Микроструктуру частиц синтезируемых порошков исследовали с применением оптической микроскопии. Микротвердость измеряли с помощью стационарного микротвердомера по методу Виккерса. Термическую обработку порошков осуществляли в электропечи с контролируемой средой инертного газа (аргон).

Результаты и их обсуждение. В ходе проведения исследований были синтезированы порошки Al–Si 10 % – Mg 0,45 % и Al–Si 12 % – Mg 0,45 %. По химическому составу основы они аналогичны сплавам Al10SiMg и Al12SiMg, которые получили широкое применение в качестве конструкционных материалов при изготовлении изделий послойным синтезом.

Установлено, что частицы порошка в процессе обработки в механореакторе проходят основные стадии формирования, характерные для технологии механического легирования. Однако первый этап, сопровождающийся измельчением исходных компонентов, выражен слабо, а процессы, связанные с грануляцией, протекают более активно. В то же время стоит отметить, что обрабатываемая шихта менее склонна к грануляции, по сравнению с другими группами алюминиевых сплавов (дуралюмины, высокопрочные сплавы), как правило, требующих введения значительного количества веществ, которые замедляют данный процесс.

С увеличением длительности обработки с 2 по 8 ч форма частиц меняется с несимметричной и оскольчатой на близкую к округлой. При этом частицы приобретают менее рельефную поверхность, уменьшается величина выступов и впадин. При длительности обработки более 6 ч гранулы полностью лишены внутренней пористости и являются гомогенными по химическому составу.

С увеличением продолжительности обработки существенно растет микротвердость частиц, значение которой повышается более чем в 2 раза при увеличении длительности механосинтеза в интервале 1–8 ч. Гранулометрический состав при этом смещается в сторону снижения среднего размера частиц.

Изучено влияние газов, подаваемых в камеру механореактора (аргон, воздух, углекислый газ, азот, кислород), на характеристики синтезируемых материалов, включая гранулометрический состав порошков, микротвердость и микроструктуру частиц. Выявлено, что с увеличением в газе содержания молекул, способных образовывать упрочняющие фазы в виде оксидов и нитридов, средний размер частиц порошков уменьшается, а микротвердость и жаропрочность увеличиваются. Так, к примеру, заполнение камеры воздухом, вместо инертного аргона, способствует уменьшению среднего размера частиц получаемого порошка на 20–25 мкм и росту микротвердости на 5–10 HV.

Установлено, что наибольшей твердостью частицы полученных порошков обладают непосредственно после механического легирования. Таким образом они находятся в наклепанном состоянии, обусловленном холодной пластической деформацией, протекающей в процессе механосинтеза. Подобное поведение не характерно материалам на основе других металлов (железо, никель), у которых максимальная твердость наблюдается после термической обработки при определенной температуре [3]. В результате отжига при температурах, достигающих 450 °С, микротвердость частиц синтезированных силуминов снижается до 2 раз, при этом ее значение на 40–70 % выше по сравнению со сплавами, полученными классическим способом.

Изучение микроструктуры частиц до и после термической обработки показало, что отжиг не оказывает на нее заметного влияния. Гранулы синтезированного порошка сохраняют плотное и однородное строение.

Выводы. Применение контролируемой газовой атмосферы в камере механореактора позволяет повысить твердость и жаропрочность синтезируемых материалов, а также является способом управления их гранулометрическим составом.

Отжиг порошков при температуре до 450 °С сопровождается снижением микротвердости частиц до 2 раз. При этом ее значение остается выше (на 40–70 %) по сравнению с твердостью классических силуминовых сплавов, что свидетельствует о высокой жаропрочности синтезируемых материалов.

Способ реакционного механического легирования может быть с успехом использован для производства жаропрочных дисперсно-упрочненных материалов на основе алюминия, что доказано на примере порошков системы алюминий–кремний–магний.

Литература

1. Ловшенко, Г. Ф. Наноструктурные механически легированные материалы на основе металлов / Г. Ф. Ловшенко, Ф. Г. Ловшенко Б. Б. Хина; под ред. д-ра техн. наук, проф. Ф. Г. Ловшенко. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2008. – 679 с.
2. A Comparative Study on the Microstructures and Mechanical Properties of Al-10Si-0.5Mg Alloys Prepared under Different Conditions / M. Guo [et al.] // Metals. – 2022. – Vol. 12, № 1. – P. 1–20.
3. Ловшенко, Ф. Г. Свойства плазменных покрытий из механически легированных порошков на основе металлов / Ф. Г. Ловшенко, А. С. Федосенко // Металлургия машиностроения. – 2019. – № 4. – С. 20–24.