

УДК 669.018.95

Д.В. Косолапов<sup>1</sup>, А.А. Шавнев<sup>1</sup>, А.Н. Няфкин<sup>1</sup>, О.И. Гришина<sup>1</sup>**ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ КОМПОЗИЦИОННЫХ ГРАНУЛ Al-SiC**

DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-3-49-52

Показаны исследования влияния времени механического легирования на формирование композиционной структуры гранул на основе высокопрочного алюминиевого сплава. В качестве исходных компонентов использованы порошки алюминиевого сплава системы Al-Zn-Mg-Cu и карбида кремния SiC. Показаны этапы формирования структуры. В процессе механического легирования под воздействием размольных тел происходило перемешивание исходных компонентов, их деформация, разрушение и сварка. С увеличением времени механического легирования осуществлялось формирование монолитной структуры композиционных гранул. Показан фракционный состав полученных композиционных гранул. Сделано заключение о влиянии времени механического легирования на структуру композиционных гранул.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 12.1. «Металлические композиционные материалы (МКМ), армированные частицами и волокнами тугоплавких соединений» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

**Ключевые слова:** металлический композиционный материал (МКМ), алюминиевый сплав, частицы карбида кремния.

*The influence of mechanical alloying time on formation of composition structure of granules based on high-strength aluminum alloy is shown. Aluminum alloy of Al-Zn-Mg-Cu system and SiC silicon carbide powders were used as initial components. Stages of structure forming are shown. In the process of mechanical alloying under the influence of grinding bodies the initial components mixing, deformation, destruction and welding occurred. As time of mechanical alloying increased the forming of monolithic structure of composition granules occurred. The fractional structure of the received composition granules is shown. The conclusion about influence of mechanical alloying time on structure of composition granules is made.*

*The work is executed within implementation of the complex scientific direction 12.1. «Metal composite materials (MCM) reinforced by particles and fibers of high-melting compositions» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].*

**Keywords:** a metal matrix composite (MMC), aluminum, silicon carbide particles.

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

**Введение**

Армирование алюминиевых сплавов частицами карбида кремния приводит к значительному повышению таких свойств, как прочность при растяжении и сжатии, модуль упругости, длительная прочность, сопротивление ползучести.

На свойства МКМ решающее влияние оказывают объемная доля SiC, тип матричного сплава и термическая обработка. Широкие возможности в изменении объемной доли, типа матрицы и термообработки приводят к сильно разнящимся между собой свойствам МКМ, приводимым в технической литературе [1–4].

Прочностные характеристики МКМ, армированных частицами SiC, определяются содержанием частиц SiC, их размером, составом матрицы, технологическими приемами изготовления, обес-

печивающими оптимальную макро- и микро-структуру.

В настоящее время в мире существует несколько технологических подходов при изготовлении данного МКМ с помощью порошковой металлургии:

– перемешивание порошков Al и SiC до получения однородной смеси, холодное изостатическое компактирование, вакуумная дегазация, горячее прессование и экструзия;

– перемешивание порошков Al и SiC, холодное компактирование, спекание и горячее прессование в готовую форму;

– перемешивание порошков Al и SiC до получения однородной смеси, горячее компактирование в вакууме и экструзия (или прокатка, или прессование) [5–7].

В США основными производителями материалов этой системы является фирма Arco Chem. Adv. Mater. Co. (технология порошковой металлургии – ПМ), а также фирмы DWA Composite Spec. Inc., Alcan Aluminium Corp., ее филиалы в San Diego (California) и отделение этой фирмы в Великобритании British Alcan (технология замешивания частиц SiC в расплав), Ceramic Process Systems, Thermal Transfer composites (комбинированная технология, включающая пропитку либо в разъемные формы, либо в оболочковые формы) и др. [8, 9].

В Японии разработкой МКМ занимается фирма Aluminium Co. Ltd., во Франции – Pechiney Centre de Rand и Renault. Кроме того, этой проблемой занимаются такие фирмы, как Kaizer, Aluminium and Chem. Corp., Science Application Internat Corp. (SAJS) и др. [10].

Наиболее перспективной технологией получения МКМ системы Al–SiC является технология ПМ, заключающаяся в предварительном приготовлении смеси порошков матричного сплава и армирующего компонента, механическом легировании (с целью обеспечения стабильного равномерного распределения частиц армирующей фазы в матрице), компактировании композиционных гранул (с целью получения низкопористой заготовки) и термодиффузионном объединении (горячее прессование, горячее изостатическое прессование, экструзия, прокатка). Данная технология позволяет получать сложнопрофильные изделия, в том числе длинномерные, со стабильной структурой и высоким уровнем свойств. Кроме того, в отличие от литейной технологии, порошковый метод обеспечивает наиболее равномерное распределение частиц армирующей фазы в объеме матричного сплава, практически полностью исключается возможность образования вторичных фаз по границе раздела «матрица–упрочнитель», так как все процессы осуществляются в твердом либо в твердожидком состоянии, а также появляется возможность использования широкой номенклатуры матричных сплавов – от литейных до деформируемых [11–15].

#### Материалы и методы

В данной работе для исследования влияния времени механического легирования на формирование структуры композиционных гранул в качестве исходных компонентов использовали порошки высокопрочного алюминиевого сплава системы Al–Zn–Mg–Cu, полученные методом газовой атомизации на установке Hermiga 10/100VI из исходных прутковых заготовок, а также порошки SiC. Для приготовления порошковой смеси матричного алюминиевого сплава и упрочняющих частиц карбида кремния применяли механическое легирование. Готовую в заданных пропорциях смесь порошков для получения композиционных гранул с объемным содержанием 10% загружали в

вибросмеситель. Для получения качественных композиционных гранул (отсутствие пористости, трещин и слоистой структуры) особое внимание уделялось процессу их формирования по времени механического легирования при постоянных значениях частоты и амплитуды колебаний вибросмесителя.

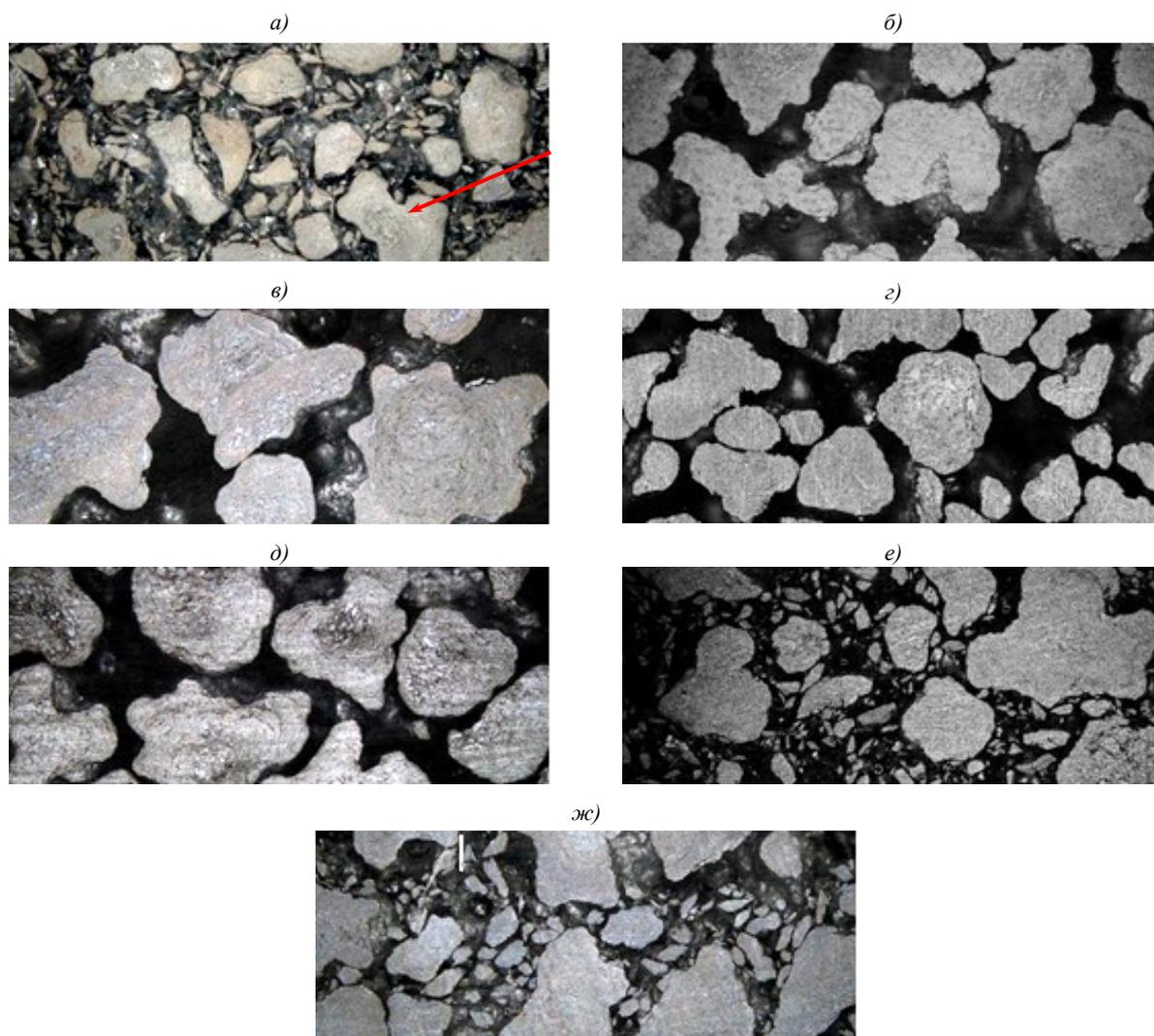
#### Результаты

В процессе механического легирования подготовленную смесь подвергали вибрационной обработке стальными шарами. С течением времени на поверхности стальных шаров образовывался в результате наклепа слой материала, представляющий собой алюминиевый сплав с внедренными в него частицами карбида кремния SiC. Этот слой нарастал до определенной величины, зависящей от пластичности алюминиевого сплава, объемной доли упрочнителя (SiC), диаметра шаров, соотношения компонентов, объемной доли стальных шаров в шихте и др., после чего наблюдалось скалывание отдельных частиц с поверхности слоя и образование на их месте новых слоев.

На начальном этапе процесса формирования композиционных гранул вязкие матричные частицы порошка алюминиевого сплава деформировались в пластины или чешуйки. С увеличением времени обработки, в результате многократной микроскопическойковки, матричные частицы усталостно разрушаются и одновременно в них внедряются упрочняющие частицы SiC. Эти процессы чередуются с процессом перемешивания и наложения частиц одна на другую, в результате чего компоненты материала образуют гранулы со слоистой структурой, при этом на отдельных частицах наблюдаются кольцеобразные слои, идущие от центра гранулы наружу (см. рисунок, а), что свидетельствует о неполном прохождении процесса пластической деформации и монолитизации гранул. Фракционный состав частиц преимущественно находится в пределах от 150 до 700 мкм с наибольшим количеством фракций размером 250 мкм.

Постепенно структура композиционных гранул приобретает однородный характер, с незначительным содержанием частиц, имеющих слоистую структуру (см. рисунок, б), что свидетельствует о практически полном прохождении процесса пластической деформации с образованием монолитных гранул. Фракционный состав находится в более узком диапазоне, находящемся в пределах от 250 до 700 мкм, с размером частиц преимущественно от 500 до 700 мкм. Это свидетельствует об окончании процесса формирования гранул и стабилизации фракционного состава.

С увеличением времени механического легирования происходит дробление композиционных гранул. Это можно наблюдать по смещению пиков значений фракционного состава гранул в сторону наименьших значений размера частиц



Структура композиционных гранул Al-SiC (стрелкой показаны кольцеобразные слои, идущие от центра гранулы наружу)

(наибольшее значение фракций находится на уровне 250 мкм), с образованием фракций от 65 до 150 мкм. При этом на структуре композиционных гранул видно, что далее происходит появление гранул, имеющих преимущественно слоистую структуру (см. рисунок, в, г). На данном этапе происходит процесс дробления с одновременным формированием новых гранул. Фракционный состав гранул находится в пределах от 250 до 700 мкм (наибольшее значение – на уровне 250 мкм) и от 100 мкм и менее (наибольшее значение – на уровне 63 мкм), что свидетельствует о прохождении процесса дробления композиционных гранул с образованием мелкой фракции.

При дальнейшем увеличении времени механического легирования наблюдается постепенное снижение количества частиц, имеющих слоистую структуру (см. рисунок, д), вплоть до формирования однородной структуры гранул (см. рисунок, е), что

свидетельствует о завершении процесса пластической деформации с образованием монолитных гранул.

Таким образом, данный этап механического легирования приводит к формированию гранул, сопоставимых по структуре с ранее полученными гранулами при меньшем времени обработки. Однако во фракционном составе гранул кроме крупных частиц размером от 250 до 700 мкм присутствуют также и мелкие – размером не более 150 мкм. Дальнейшее механическое легирование (см. рисунок, ж) полностью повторяет ранее описанный процесс, что свидетельствует о цикличности процесса.

#### Обсуждение и заключения

При механическом легировании происходит ряд структурных процессов. На начальном этапе частицы алюминиевого сплава деформируются в

пластины или чешуйки, которые с увеличением времени обработки усталостно разрушаются и одновременно в них внедряются упрочняющие частицы карбида кремния. Эти процессы чередуются с эффектом перемешивания и наложения частиц одна на другую, в результате чего компоненты материала образуют гранулы со слоистой структурой.

Постепенно слоистый характер структуры исчезает, композиционные гранулы приобретают

округлую форму, в их объеме происходит образование однородного материала, состоящего из матрицы и равномерно распределенных в ней частиц карбида кремния.

На основании проведенного исследования влияния времени механического легирования на формирование структуры композиционных гранул сделано заключение о том, что данный процесс носит циклический характер.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33.
2. *Алюминиевые сплавы // История авиационного материаловедения. ВИАМ – 80 лет: годы и люди / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2012. С. 143–156.*
3. Каблов Е.Н. Химия в авиационном материаловедении // *Российский химический журнал*. 2010. Т. LIV. №1. С. 3–4.
4. Каблов Е.Н. *Авиакосмическое материаловедение // Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2008. №3. С. 2–14.
5. Каблов Е.Н. *Современные материалы – основа инновационной модернизации России // Металлы Евразии*. 2012. №3. С. 10–15.
6. Тарасов Ю.М., Антипов В.В. Новые материалы ВИАМ – для перспективной авиационной техники производства ОАО «ОАК» // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №2. С. 5–6.
7. Каблов Е.Н., Герасимов В.В., Висик Е.М., Демонис И.М. Роль направленной кристаллизации в ресурсосберегающей технологии производства деталей ГТД // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2013. №3. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.03.2015).
8. Шмотин Ю.Н., Старков Р.Ю., Данилов Д.В., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. Новые материалы для перспективного двигателя ОАО «НПО „Сатурн”» // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №2. С. 6–8.
9. Курганова Ю.А. Перспективы развития металломатричных композиционных материалов промышленного назначения // *Сервис в России и за рубежом*. 2012. Т. 30. №3. С. 235–240.
10. Курганова Ю.А., Чернышева Т.А., Кобелева Л.И., Курганов С.В. Эксплуатационные характеристики алюмоматричных дисперсно-упрочненных композиционных материалов и перспективы их использования на современном рынке конструкционных материалов // *Металлы*. 2011. №4. С. 71.
11. Chawla N., Chawla K.K. *Metal Matrix Composites*. Springer Science+Business Media, Inc., 2006. 401 p.
12. Каблов Е.Н., Щетанов Б.В., Гращенков Д.В., Шавнев А.А., Няфкин А.Н. Металломатричные композиционные материалы на основе Al–SiC // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 373–380.
13. Каблов Е.Н., Гращенков Д.В., Щетанов Б.В., Шавнев А.А., Няфкин А.Н., Вдовин С.М., Нищев К.Н., Чибиркин В.В., Елисеев В.В., Эмих Л.А. Металлические композиционные материалы на основе Al–SiC для силовой электроники // *Механика композиционных материалов и конструкций*. 2012. Т. 18. №3. С. 359–368.
14. Каблов Е.Н., Чибиркин В.В., Вдовин С.М. Изготовление, свойства и применение теплоотводящих оснований из ММК Al–SiC в силовой электронике и преобразовательной технике // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №2. С. 20–22.
15. Гончаренко Е.С., Трапезников А.В., Огородов Д.В. Литейные алюминиевые сплавы (к 100-летию со дня рождения М.Б. Альтмана) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №4. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.03.2015). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-4-2-2.