

УДК 669.018.95

А.В. Гололобов<sup>1</sup>, А.Н. Няфкин<sup>1</sup>, А.Н. Жабин<sup>1</sup>**АСПЕКТЫ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ  
ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННОГО МЕТАЛЛИЧЕСКОГО  
КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА,  
ПОЛУЧЕННОГО НА ОСНОВЕ СТРУЖКИ И ПОРОШКА  
АЛЮМИНИЕВОГО КОРРОЗИОННОСТОЙКОГО СПЛАВА**

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-12-39-46

*Исследован металлический композиционный материал (МКМ) на основе алюминиево-го коррозионностойкого сплава марки АМг6, содержащий 22,5 % (объемн.) карбида кремния, полученный путем механического легирования. Рассмотрены аспекты формирования структуры МКМ на основе стружки и порошка из данного сплава. Исследовано влияние исходных компонентов на структуру дисперсно-упрочненного МКМ, а также изготовлены образцы из данного композиционного материала.*

**Ключевые слова:** *металлический композиционный материал, алюминиевый сплав, карбид кремния, стружка, порошок, механическое легирование, экструзия, структура.*

A.V. Gololobov<sup>1</sup>, A.N. Nyafkin<sup>1</sup>, A.N. Zhabin<sup>1</sup>**ASPECTS OF STRUCTURE FORMATION DISPERSION-STRENGTHENED  
METAL COMPOSITE MATERIAL OBTAINED ON THE BASIS OF SHAVINGS  
AND POWDER OF ALUMINUM CORROSION-RESISTANT ALLOY**

*A metal composite material (MCM) based on an aluminum corrosion-resistant alloy of the AMg6 brand, containing 22.5 % (vol.) Silicon carbide, obtained by mechanical alloying, has been investigated. Aspects of the formation of the MCM structure based on chips and powder from this alloy are considered. The influence of the initial components on the structure of the dispersion-strengthened MCM was investigated, and samples were made from this composite material.*

**Keywords:** *metal composite material, aluminum alloy, silicon carbide, shavings, powder, mechanical alloying, extrusion, structure.*

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute»]; e-mail: admin@viam.ru

**Введение**

В настоящее время необходимо создание перспективных материалов с высоким уровнем весового совершенства и прочностных характеристик, а также изделий на их основе. Одним из путей решения данной задачи является использование, вместо традиционных, перспективных дисперсно-упрочненных металлических композиционных материалов (МКМ), которые благодаря совокупности своих свойств могут найти применение в сверхлегких высоконагруженных конструкциях в различных отраслях промышленности [1, 2].

Применение дисперсно-упрочненных МКМ на основе алюминиевых сплавов, а также совершенствование технологий получения деталей из них позволит обеспечить требуемый уровень физико-механических свойств и эксплуатационных характеристик изготавливаемых из них изделий [3, 4].

Такие композиционные материалы все больше находят применение в автомобильной и аэрокосмической отраслях промышленности, а также в теплотехнике и оптико-механических устройствах.

Для успешного использования МКМ на основе алюминиевого сплава необходимо решение следующих задач: развитие представлений о структуре материала, особенно о факторах, влияющих на его целостность, в том числе агломерирования; улучшение стойкости материала, преимущественно его твердости и вязкости; использование при производстве МКМ промышленных отходов (стружки) и побочных продуктов; использование новых алюминиевых сплавов в качестве матричных; формирование классификации исходных компонентов для МКМ по свойствам и стоимости; создание простого, недорогого и эффективного неразрушающего контроля; разработка способов подбора и соотношения исходных компонентов; создание технологий переработки изделий; формирование информационной базы [5–7].

Армирование алюминиевых сплавов частицами карбида кремния (SiC) приводит к значительному повышению таких свойств, как прочность при растяжении и сжатии, модуль упругости, сопротивление усталости и ползучести, однако при этом снижаются показатели относительного удлинения и вязкости разрушения. Наличие в матрице армирующих компонентов изменяет и технологические характеристики материала – например, изменяются параметры процессов деформации (в частности, повышается температура деформации МКМ, снижается допустимая степень деформации за один проход) [8].

На свойства МКМ решающее влияние оказывает объемная доля упрочняющего материала, тип матричного сплава и термическая обработка [9].

Подбор состава и соотношения исходных компонентов, а также применение различных методов изготовления позволяют при создании МКМ направленно регулировать физико-механические характеристики и диапазон рабочих температур материала [10, 11].

Структура дисперсно-упрочненного МКМ в общей сложности представляет собой металлическую матрицу, в которой равномерно распределены микрочастицы упрочняющей фазы. Металлическая матрица обеспечивает пластичность, а керамическая фаза улучшает показатели прочности, жесткости, термо- и износостойкости [12]. Механизм упрочнения МКМ обусловлен созданием частицами упрочняющей фазы барьеров для перемещения дислокаций аналогично тому, как этот механизм проявляется в сплавах с дисперсионным твердением. Использование алюминиевых сплавов в качестве металлической матрицы в МКМ является предпочтительным благодаря их преимуществам перед другими сплавами, таким как высокие технологичность и эксплуатационные характеристики, а также низкая стоимость [13–15].

В данной работе рассматривается МКМ, полученный на основе стружки и порошка из алюминиевого коррозионностойкого сплава АМг6.

Цель работы – получение композиционных гранул МКМ на основе алюминиевого сплава АМг6, содержащего 22,5 % (объемн.) карбида кремния, с равномерным распределением армирующего компонента и минимальной пористостью, а также сравнение структур композиционного материала на основе стружки и на основе порошка с разным размером фракции.

### Материалы и методы

Для изготовления композиционного материала системы Al–SiC использовали стружку (с размером частиц 50–150 мкм) и порошок (с размером частиц 10–100 мкм) из алюминиевого сплава марки АМг6, а также порошок карбида кремния марки 63С с зернистостью М5 (F1200) и размером частиц 5–10 мкм в соответствии с ГОСТ 3647–80.

Химический состав сплава марки АМг6 включает до 93,68 % (по массе) алюминия; 5,8–6,8 % (по массе) магния и прочие примеси (по ГОСТ 4784–97). Такой алюминиевый сплав обладает хорошей обрабатываемостью резанием и давлением, а также высокой коррозионной стойкостью.

Массу исходных компонентов, загружаемых для обработки, выбирали исходя из содержания карбида кремния в композиционном материале: 77,5 % (по массе) – сплав АМг6, 22,5 % (объемн.) – SiC.

Для дальнейшего использования стружки и порошка из алюминиевого сплава АМг6, а также порошка карбида кремния проводили сушку в вакууме для удаления влаги с поверхности порошков. Далее просушенные исходные компоненты перемешивали в V-образном смесителе. Затем проводили механическое легирование в вибросмесителе СмВ-0,05 в течение 5–40 ч в среде инертного газа с использованием мелющих тел в виде стальных шаров диаметром 8 мм.

Процесс механического легирования считается уникальным процессом производства соединений разнородных составляющих в форме порошка. Продуктом процесса являются композиционные гранулы, состоящие из однородной смеси компонентов. При этом происходят измельчение и пластическая деформация компонентов.

Исследование композиционных гранул и их механическая обработка очень затруднены без применения специальных приспособлений, позволяющих приготавливать и исследовать шлифы, которые имеют сложную конфигурацию и низкую прочность.

Запрессовку образцов проводили при нагреве в формовочном материале, который запрессовывали в термоактивную смолу PolyFast.

Такой способ закрепления образцов применяют только в тех случаях, когда давление и температура не изменяют микроструктуру и не деформируют образец. Заливку образцов проводили на автоматическом прессе для горячей запрессовки CitoPress-1 фирмы Struers (Дания).

Металлографические шлифы изготавливали на установке Tegamin 25 фирмы Struers. Целью шлифовки и механической полировки является получение металлических шлифов без рисок, рельефа, ямок и деформации. Данные процессы служат для удаления толстого наклепанного поверхностного слоя, а также грубых рисок, оставшихся после резания.

На завершающей стадии проводили полирование абразивными пастами. Для полировки использовали очень мелкий абразив, смешанный с жидкостью, который в виде пасты или суспензии наносили на подкладку из специальной ткани, прикрепленной к диску. Другим существенным отличием операции полировки является непрерывное вращение образца, чтобы образовались чрезвычайно тонкие риски во всех направлениях. Финишное полирование осуществляли с помощью суспензии OP-S Suspension.

Для получения монолитного МКМ композиционные гранулы просеивали до фракции размером не более 900 мкм на установке EML 200, затем проводили отжиг гранул в вакууме. После отжига гранулы подвергали холодному и горячему компактированию до получения брикетов. Полученные брикеты экструдировали с коэффициентом вытяжки 15.

### Результаты и обсуждение

Исследование структуры композиционных гранул и МКМ проводили после механического легирования и экструзии. Для изучения структуры изготовили шлифы полученных композиционных гранул и образцов из МКМ системы АМг6–SiC.

На рис. 1 представлена структура композиционных гранул на основе стружки композиционного материала системы Al–SiC в количестве карбида кремния 22,5 % (объемн.) после механического легирования. На рис. 1, б наблюдается присутствие большого количества необработанной фазы матричного сплава (светлые зоны). Форма матричной

зоны имеет вытянутый вид, что соответствует форме исходного компонента, а именно стружки. В композиционных гранулах видны трещины, форма гранул неравномерная (рис. 1, в, з). С увеличением продолжительности механического легирования количество необработанной матричной фазы уменьшается, форма гранул становится округлой (рис. 1, д, е). Кроме того, видна заметная трещина на более крупной грануле, вследствие чего возможно ее разделение на две части (рис. 1, в), что не имеет существенного значения. В новообразованных гранулах меньшего размера видна матричная фаза, находящаяся ближе к поверхности, за счет чего армирование упрочняющей фазы будет происходить гораздо быстрее (рис. 1, д).

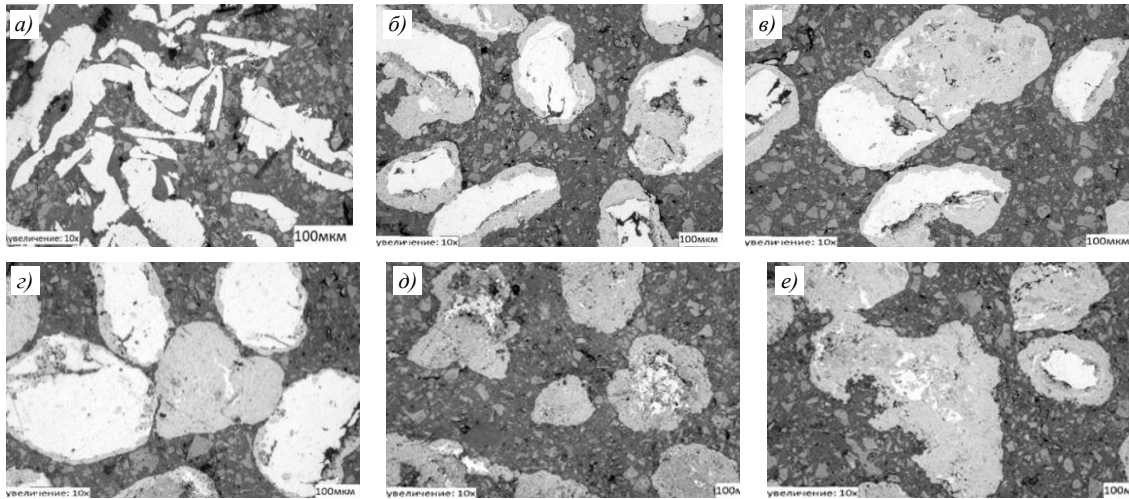


Рис. 1. Структура композиционных гранул на основе стружки из алюминиевого сплава марки АМг6 (а) с разным периодом выгрузки (б–е)

Следует отметить, что получаемые методом механического легирования композиционные гранулы на основе стружки из алюминиевого сплава АМг6 имеют более глобулярные агломераты, выраженные матричным сплавом, которые, по сути, должны обволакивать частицы порошка SiC в процессе механического легирования и способствовать лучшему армированию.

На рис. 2 представлена структура прутка из МКМ на основе стружки из алюминиевого сплава АМг6 после экструзии. Видно, что в структуре прутка из материала, полученного из композиционных гранул на основе стружки, наблюдаются светлые зоны с неравномерной границей непроармированного матричного сплава (рис. 2, а) и видимой пористостью (рис. 2, а, б).

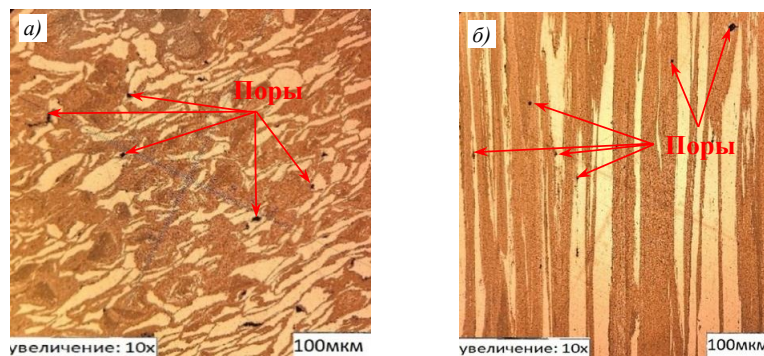


Рис. 2. Структура прутка из МКМ на основе стружки из алюминиевого сплава АМг6 (вид в поперечном (а) и продольном (б) направлениях экструзии)

На рис. 3 представлена структура композиционных гранул системы АМг6–SiC после механического легирования, проведенного с разной продолжительностью.

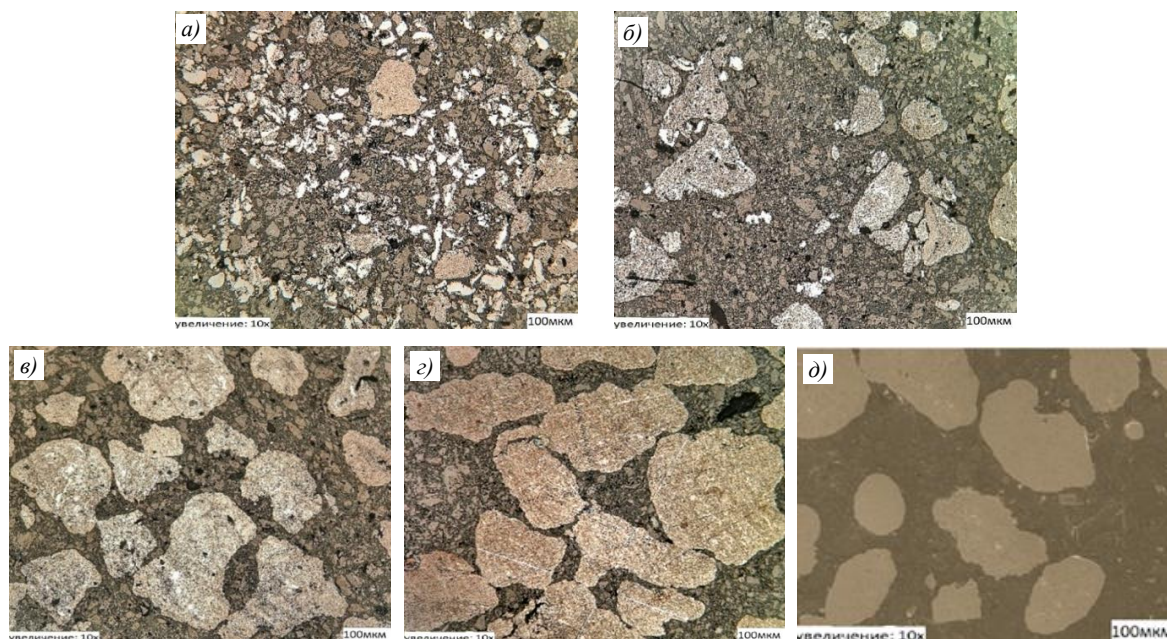


Рис. 3. Структура композиционных гранул системы АМг6–SiC после механического легирования, проведенного в течение 5 (а), 10 (б), 20 (в), 30 (г) и 40 ч (д)

Видно, что структура композиционных гранул меняется в зависимости от продолжительности проведения механического легирования (рис. 3, а–г). После механического легирования в течение 5 ч композиционные гранулы некрупные, имеют неоднородную структуру и мелкие трещины (рис. 3, а). При этом небольшое количество необработанной матричной фазы уменьшается с увеличением продолжительности механического легирования с 10 до 30 ч, т. е. структура композиционных гранул становится более равномерной после 30 ч механического легирования, дальнейшего изменения структуры не происходит (рис. 3, б–г).

Результаты исследований показали, что продолжительность механического легирования для получения композиционных гранул с более равномерной структурой должна составлять гораздо больше 30 ч.

На рис. 4 представлена структура алюминиевого порошка из сплава АМг6 с размером фракции  $\geq 34$  мкм и композиционных гранул системы АМг6–SiC с разным периодом выгрузки после механического легирования. Матричная фаза обладает сферической формой (рис. 4, а), которую считают идеальной для процесса сцепления двух разнородных компонентов при механическом легировании. Структура полученных композиционных гранул имеет неопределенное количество непроармированной зоны матричной фазы, при использовании порошка в качестве исходного компонента процесс механического легирования способствует облегченному армированию (рис. 4, б–г).

На рис. 5 представлена структура прутка из МКМ на основе порошка из алюминиевого сплава АМг6 после экструзии. Видно, что в структуре прутка из материала, полученного из композиционных гранул на основе порошка с размером фракции  $\geq 34$  мкм, наблюдаются светлые зоны с неравномерной границей матричного сплава и менее видимой пористостью (рис. 5, а, б). В отличие от структуры прутка из МКМ, за исходный компонент которого взята стружка из алюминиевого сплава АМг6, светлых зон с непроармированной матрицей стало меньше (рис. 5, а и рис. 6, а).

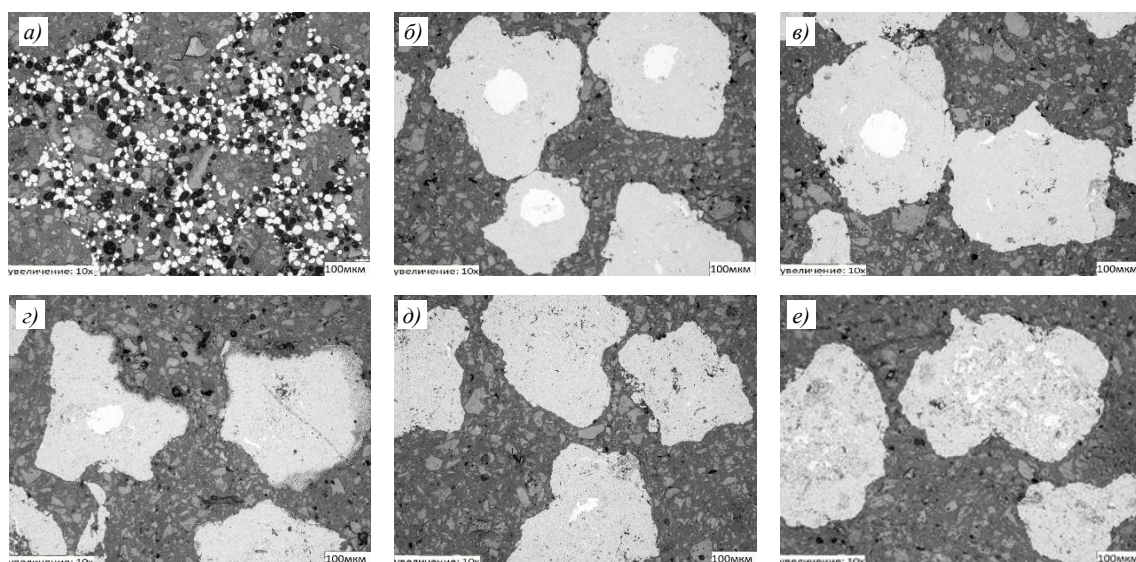


Рис. 4. Структура алюминиевого порошка из сплава АМг6 с размером фракции  $\geq 34$  мкм (а) и композиционных гранул системы АМг6–SiC с разным периодом выгрузки после механического легирования (б–е)

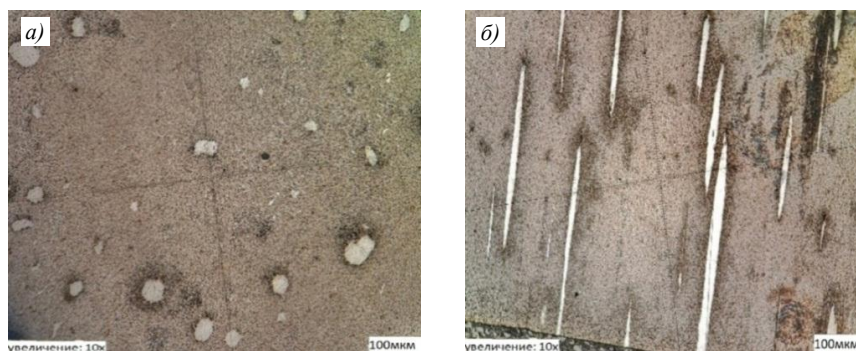


Рис. 5. Структура прутка из МКМ на основе порошка из алюминиевого сплава АМг6 (вид в поперечном (а) и продольном (б) направлениях экструзии)

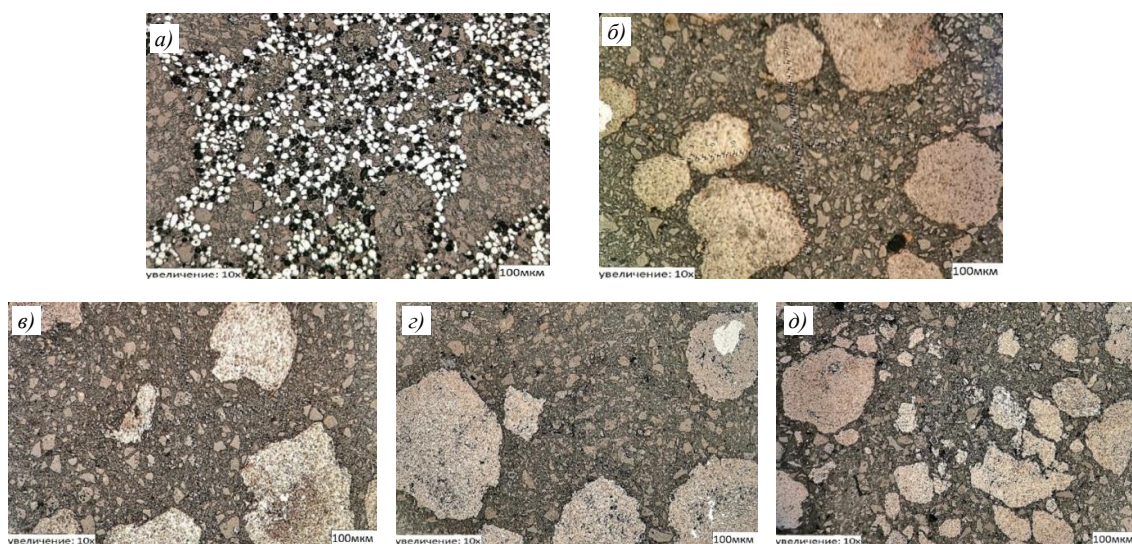


Рис. 6. Структура алюминиевого порошка из сплава АМг6 с размером фракции  $\leq 34$  мкм (а) и композиционных гранул системы АМг6–SiC с разным периодом выгрузки после механического легирования (б–д)

На рис. 6 представлена структура алюминиевого порошка из сплава АМг6 с размером фракции  $\leq 34$  мкм и композиционных гранул системы АМг6–SiC с разным периодом выгрузки после механического легирования. Результаты исследования показали, что в такой структуре, в отличие от структуры композиционных гранул, полученных с использованием в качестве исходных компонентов стружки и порошка с большим размером фракции ( $\geq 34$  мкм), светлых зон с непроармированной матрицей стало еще меньше (рис. 6, б–д). Это свидетельствует о том, что чем меньше размер фракции исходного компонента в порошковой смеси, тем лучше структура материала будет получена в процессе армирования.

Таким образом, для получения композиционных гранул с более равномерной структурой требуется механическое легирование большей продолжительности. Сравнительная композиции, полученные из таких исходных компонентов, как стружка и порошок из алюминиевого сплава АМг6, следует отметить, что наиболее качественным продуктом для изготовления композиционных гранул является порошковая композиция, которую считают наиболее приемлемым исходным компонентом по сравнению со стружкой.

Необходимо также отметить особое влияние исходных компонентов – стружки и порошка из алюминиевого сплава АМг6 на структуру МКМ. В структуре материала на основе стружки из матричного сплава преобладает большее количество непроармированных границ между матрицей и упрочняющим компонентом по сравнению со структурой МКМ на основе порошка, у которого преобладают частицы матричного сплава – в результате граница «матрица–упрочнитель» имеет меньше непроармированных зон. В дальнейшем такая структура МКМ на основе стружки или порошка из алюминиевого сплава АМг6 может влиять на механические свойства композиционного материала.

### Заключения

Проведен анализ структуры композиционных гранул. Установлено, что в композиционных гранулах, где в качестве исходного компонента применяли стружку из алюминиевого сплава АМг6, обнаружено большое количество необработанной фазы матричного сплава и присутствие трещин в гранулах, в отличие от композиционных гранул, где в качестве исходного компонента использовали порошок из алюминиевого сплава АМг6 с разным размером фракции. В таких гранулах обнаружено значительно меньшее количество зон необработанной матричной фазы и отсутствие трещин в гранулах.

Установлено также, что в процессе механического легирования структура композиционных гранул претерпевает изменения, связанные с деформацией пластичной алюминиевой матрицы, внедрением в нее частиц карбида кремния (которые тоже измельчаются в процессе обработки), холодной сваркой агломератов между собой и их последующим разрушением. Определена оптимальная продолжительность технологического процесса механического легирования МКМ на основе алюминиевого сплава АМг6, армированного частицами карбида кремния, при которой получаемые композиционные гранулы обладают равномерной структурой, – она составляет 30 ч; дальнейшего изменения структуры не происходит.

Проведен анализ структуры прутков из МКМ. Установлено, что после экструзии в структуре прутка из материала, полученного на основе порошка, в отличие от структуры прутка из МКМ на основе стружки, обнаружено меньше скоплений светлых зон с неравномерной границей матричного сплава и минимальной пористостью.

Выполнен сравнительный анализ влияния исходных компонентов на структуру МКМ, получаемых на основе стружки и порошка с разным размером фракции.

Установлено, что в структуре материала на основе стружки преобладает большее количество непроармированных зон между матрицей и упрочняющим компонентом, в отличие от структуры МКМ на основе порошка, в котором непроармированных зон на границе «матрица–упрочнитель» меньше, что в дальнейшем может влиять на механические свойства композиционного материала.

#### Библиографический список

1. Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра // *Металлы Евразии*. 2015. № 1. С. 36–39.
2. 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. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
3. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // *Вестник Российской академии наук*. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
4. Антипов В.В. Перспективы развития алюминиевых, магниевых и титановых сплавов для изделий авиационно-космической техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 186–194. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-186-194.
5. Гращенков Д.В. Стратегия развития неметаллических материалов, металлических композиционных материалов и теплозащиты // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 264–271. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-264-271.
6. Alaneme K.K., Bodunrin M.O. Corrosion behavior of alumina reinforced aluminium (6063) metal matrix composites // *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*. 2011. Vol. 10. No. 12. P. 1153–1165.
7. Singh J., Chauhan A. Characterization of hybrid aluminum matrix composites for advanced applications – a review // *Journal of Materials Research and Technology*. 2016. Vol. 5. No. 2. P. 159–169.
8. Косолапов Д.В., Шавнев А.А., Няфкин А.Н., Гришина О.И. Исследование формирования структуры композиционных гранул Al–SiC // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. № 3 (42). С. 49–52. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-3-49-52.
9. Косолапов Д.В., Шавнев А.А., Курбаткина Е.И., Няфкин А.Н., Гололобов А.В. Исследование структуры и свойств дисперсноупрочненного МКМ на основе алюминиевого сплава системы Al–Mg–Si // *Труды ВИАМ*. 2020. № 1 (85). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.06.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-58-67.
10. Miller W.S., Humphreys F.J. Strengthening mechanisms in particulate metal matrix composite // *Scripta Metallurgica et Materialia*. 1991. Vol. 25. P. 33–38.
11. Velidandla B., Radhakrishna B., Anjilivelil K. et al. P/M processing of Al–SiC composites // *Journal of Powder Metallurgy*. 1991. Vol. 27. P. 227–235.
12. Deaquino-Lara R., Gutierrez-Castaneda E., Estrada-Guel I. et al. Structural characterization of aluminium alloy 7075-graphite composites fabricated by mechanical alloying and hot extrusion // *Materials and Design*. 2014. Vol. 53. P. 1104–1111.
13. Yuan W., Zhang J., Zhang C., Chen Z. Processing of ultrahigh strength SiC<sub>p</sub>/Al–Zn–Mg–Cu composites // *Journal of Materials Processing Technology*. 2009. Vol. 209. P. 3251–3255.
14. Verma R.K., Mahesh N.S., Anwar M.I. Numerical Analysis of Powder Compaction to Obtain High Relative Density in '601AB' Aluminum Powder // *SasTech journal*. 2012. Vol. 11. Is. 1. P. 79–84.
15. Veeresh Kumar G.B., Rao C.S.P., Selvaraj N., Bhagyashekar M.S. Studies on Al6061–SiC and Al7075–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Metal Matrix Composites // *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*. 2010. Vol. 9. No. 1. P. 43–55.