

Известия Алтайского государственного университета. 2024. № 1 (135). С. 37–42.

Izvestiya of Altai State University. 2024. No 1 (135). P. 37–42.

Научная статья

УДК 538.9:621.762:669.715

DOI: 10.14258/izvasu(2024)1-04

## Получение алюмоматричных композитных материалов по технологии электроимпульсного спекания

*Олег Александрович Масанский<sup>1</sup>, Александр Михайлович Токмин<sup>2</sup>,*

*Александр Георгиевич Анисимов<sup>3</sup>, Семен Олегович Масанский<sup>4</sup>*

<sup>1</sup>Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия, pi775@yandex.ru

<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия, tam550@yandex.ru

<sup>3</sup>Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, Россия, anis@hydro.nsc.ru

<sup>4</sup>Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия, masansky.sema2002@gmail.com

Original article

## Production of Aluminum-Matrix Composite Materials Using Spark Plasma Sintering

*Oleg A. Masanskii<sup>1</sup>, Alexander M. Tokmin<sup>2</sup>, Alexander G. Anisimov<sup>3</sup>,*

*Semyon O. Masanskii<sup>4</sup>*

<sup>1</sup>Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia, pi775@yandex.ru

<sup>2</sup>Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia, tam550@yandex.ru

<sup>3</sup>Lavrentiev Institute of Hydrodynamics SB RAS, Novosibirsk, Russia, anis@hydro.nsc.ru

<sup>4</sup>Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia, masansky.sema2002@gmail.com

Развитие современной промышленности как отечественной, так и зарубежной требует разработки новых материалов с повышенными характеристиками физико-механических и эксплуатационных свойств. Это обусловлено тем, что применение имеющихся на сегодняшний день материалов для достижения требуемых характеристик практически исчерпало свой ресурс. Проведенный анализ технологий получения алюмоматричных композиционных материалов (ММКМ): ультразвуковое замешивание, плазменная инъекция порошковых частиц, методы эндо- и экзогенного армирования, инъекция струей инертного газа, механическое замешивание реакционно-активных порошков и др. — позволяет сделать вывод, что используемые методы получения ММКМ не имеют стабильных результатов, а в некоторых случаях применимы только для отдельных видов ММКМ (по типу матрицы).

В статье приведены результаты исследования возможности получения алюмоматричного композитного материала с армирующими частицами из стали 10P6M5 по технологии электроимпульсного спекания (Spark Plasma Sintering, SPS) путем одновременного воздействия на порошковую заготовку короткого мощного высоковольтного импульса электрического тока и механического давления.

The development of modern domestic and foreign industry requires the development of new materials with enhanced physical, mechanical, and operational properties. This is because the availability of the existing materials with the desired properties is stretched almost to the limit. There are several techniques for producing metal matrix composite materials (MMCM), such as ultrasound mixing, injection of powders in plasma jets, methods of endo- and exogenous reinforcement, injection with inert gas jets, mixing of reactive powders, etc. The conducted analysis of the mentioned techniques allows to conclude that available techniques lack stability of their results and, in some cases, are applicable only for certain types of MMCM (by matrix types).

The article presents the investigation results of the prospective technique for producing aluminum-matrix composite materials reinforced by the 10R6M5 steel particles using the spark plasma sintering (SPS). The proposed prospective technique uses the exposure of powdered metals to short powerful high-voltage electric pulse under mechanical pressure.

Показано влияние технологических режимов на формирование структуры полученного алюмоматричного композитного материала.

**Ключевые слова:** композитные материалы, алюмоматричные композитные материалы, армирующие частицы, электроимпульсное спекание

**Для цитирования:** Масанский О.А., Токмин А.М., Анисимов А.Г., Масанский С.О. Получение алюмоматричных композитных материалов по технологии электроимпульсного спекания // Известия Алтайского государственного университета. 2024. № 1 (135). С. 37–42. DOI: 10.14258/izvasu(2024)1-04.

### Введение

Развитие современной промышленности как отечественной, так и зарубежной требует разработки новых материалов с повышенными характеристиками физико-механических и эксплуатационных свойств. Это обусловлено тем, что применение имеющихся на сегодняшний день материалов для достижения требуемых характеристик практически исчерпало свой ресурс.

В настоящее время особый интерес представляют металломатричные композиционные материалы (ММКМ) с армированной гетерофазной структурой. ММКМ относятся к литым композиционным материалам функционального и конструкционного назначения, состоящим из металлической основы (матрицы), армированной равномерно или заданным образом распределенными в ней тугоплавкими высокомодульными частицами экзогенного и/или эндогенного происхождения, не растворяющимися в металле матрицы при температурах получения и эксплуатации изделий [1, 2]. Целью создания ММКМ является объединение схожих или разнородных компонентов для получения материала с новыми заданными свойствами и характеристиками, отличными от свойств и характеристик исходных компонентов. С появлением такого рода материалов возникает возможность селективного выбора свойств создаваемых композитных материалов (КМ), необходимых для нужд в конкретной области применения. В качестве материала матрицы могут быть использованы как «чистые» металлы, так и сплавы на их основе. Стоит отметить, что матрица может состоять не только из одного компонента, а из двух и более разнородных материалов, что относится к полиматричным КМ. Усиливающими или армирующими компонентами чаще всего являются тонкодисперсные порошкообразные, в том числе и наночастицы или волокнистые материалы различной природы. Технологический процесс получения литых композитных материалов (ЛКМ) и отливок из них может быть условно разделен на три основные стадии: подготовка расплава и армирующих частиц; совмещение

The investigation results also demonstrate the impact of operating conditions on structures of the produced aluminum-matrix composite materials.

**Keywords:** composite materials, aluminum matrix composite materials, reinforcing particles, electric pulse sintering

**For citation:** Masanskii O.A., Tokmin A.M., Anisimov A.G., Masanskii S.O. Production of Aluminum-Matrix Composite Materials Using Spark Plasma Sintering. *Izvestiya of Altai State University*. 2024. No 1 (135). P. 37–42. (In Russ.). DOI: 10.14258/izvasu(2024)1-04.

армирующих частиц и матрицы; обработка полученных смесей в жидком, кристаллизующемся и твердом состояниях [3].

Структура ММКМ представляет собой матрицу, состоящую из металла или сплава, с растворенными в ней армирующими частицами, которые могут быть как искусственно введенными на одной из технологических стадий получения материала (экзогенно-армированные композиты), так и синтезированными непосредственно в матричном расплаве в процессах плавки и литья (эндогенно-армированные композиты) [4].

Разработка и создание новых ММКМ позволит повысить экономическую эффективность деталей машин и оборудования различного назначения за счет снижения удельного веса, повышения прочностных характеристик, низкого линейного коэффициента термического расширения, повышения жаропрочности, коррозионно- и износостойкости, тепло- и электропроводности.

В настоящее время, по экспертным оценкам, доля литых композитных материалов на основе алюминиевой матрицы в общемировом объеме производства металломатричных композитов составляет более 50 % [5]. Наибольшее применение находят материалы, армированные SiC — около 19 % и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — около 10 % [5].

Наиболее распространенным методом получения литейных ММКМ является метод совмещения фаз путем энергичного перемешивания расплава матрицы с вводом в него дисперсных частиц или коротких волокон армирующих компонентов (рис. 1).

Данный метод имеет ряд недостатков, к основным из которых можно отнести: интенсивное газонасыщение расплава матрицы в процессе замешивания армирующих частиц, пористость полученных отливок, образование конгломератов из армирующей фазы и окисных пленок матричного материала, невозможность введения тонкодисперсной, в том числе наноразмерной, армирующей фазы, эрозионный износ лопастей импеллера.

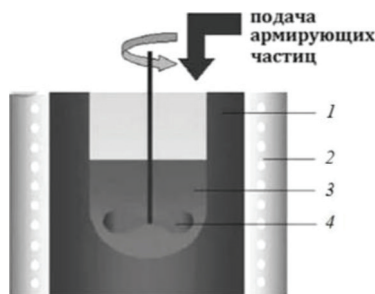


Рис. 1. Схема получения ММКМ методом механического замешивания: 1 — тигель; 2 — печь; 3 — матричный расплав; 4 — импеллер

Проведенный анализ технологий получения ММКМ: ультразвуковое замешивание, плазменная инжекция порошковых частиц, методы эндо- и экзогенного армирования, инжекция струей инертного газа, механическое замешивание реакционно-активных порошков и др. — позволяет сделать вывод, что используемые методы получения ММКМ не имеют стабильных результатов, а в некоторых случаях применимы только для отдельных видов ММКМ (по типу матрицы).

**Целью настоящей работы** является исследование возможности получения ММКМ по технологии электроимпульсного спекания (Spark Plasma Sintering, SPS).

**Задачи работы**

Получить алюмоматричный композитный материал (АМКМ) по технологии электроимпульсного спекания.

Провести металлографические исследования полученных образцов алюмоматричного композитного материала.

Определить влияние технологических параметров получения АМКМ на формирование структуры.

**Материалы и методы исследования**

Образцы АМКМ были получены по технологии электроимпульсного спекания. Состав композита: матрица — алюминий технической чистоты; армирующие частицы — сталь 10P6M5 в виде металлического порошка с размером частиц 100–300 мкм. Химический состав стали 10P6M5 (масс. %): С — 0.8–0.9; Cr — 3.5–4.5; Mo — 4.8–5.3; W — 5.5–6.5; V — 1.7–2.1. Полученные образцы АМКМ исследовали металлографическим методом с применением травителей различного состава.

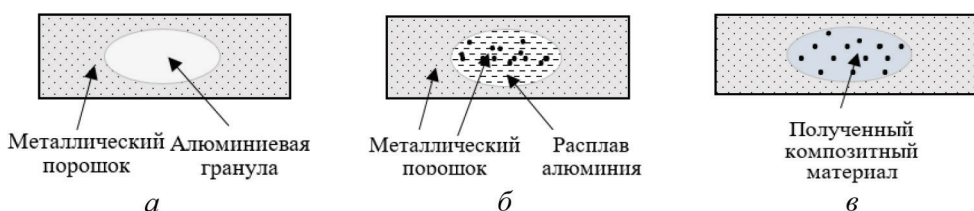


Рис. 3. Схема получения ММКМ: а — общий вид заготовки ММКМ в пресс-форме; б — в процессе прессования; в — полученный образец ММКМ

**Полученные результаты и их обсуждение**

Получение ММКМ по технологии электроимпульсного спекания (Spark Plasma Sintering, SPS) осуществлялось на установке Labox Sinter Land Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск.

Данная технология предусматривает получение изделий из порошковых материалов при одновременном воздействии на порошковую заготовку короткого мощного высоковольтного импульса электрического тока и механического давления. Длительность импульса тока, как правило, не более  $10^{-3}$  с, а амплитуда плотности тока в импульсе:  $j > 10^4$  А/см<sup>2</sup>, давление в процессе спекания составляет 40 МПа. Принципиальная схема получения образцов приведена на рисунке 2. Спекаемая шихта 1 помещается в матрицу 2, выполненную из диэлектрического материала. Пуансоны 3, которые являются и токопроводами, создают давление на заготовку и передают импульсы тока, разряд которых обеспечивает мощное выделение тепла. Данная технология относится к инновационным и направлена на создание композитных, градиентных, наноструктурированных и других современных материалов.

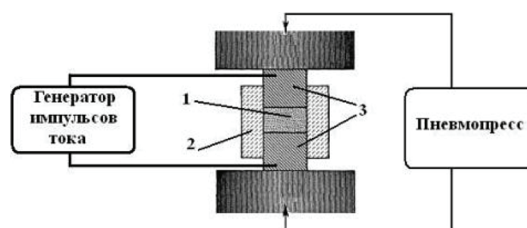


Рис. 2. Схема получения образцов по технологии электроимпульсного спекания

В ходе выполнения работы был получен ММКМ на основе алюминия технической чистоты марки А5. В качестве армирующих частиц был использован металлический порошок быстрорежущей стали 10P6M5 с размером частиц 100–300 мкм. Схемы образцов до, в процессе и после спекания приведены на рисунке 3.

Экспериментальные образцы получали по следующим режимам:

Режим 1 — давление P=40 МПа, температура спекания 620 °С, время спекания t=5 мин.

Режим 2 — давление P=40 МПа, температура спекания 700 °С, время спекания t=5 мин.

Общий вид полученного образца и поперечный разрез для проведения исследований приведен на рисунке 4.

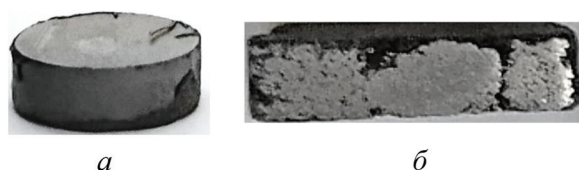
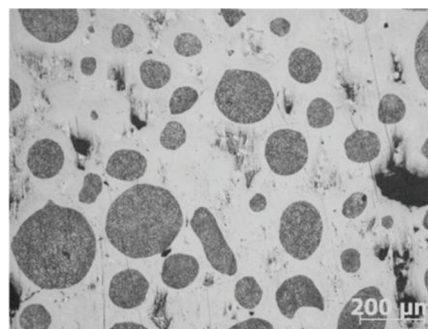


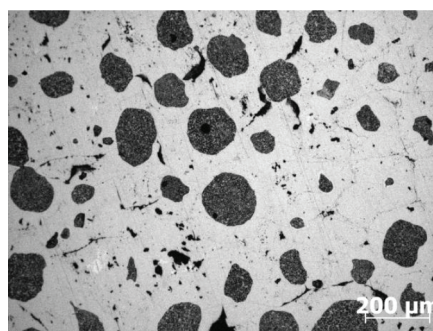
Рис. 4. Полученный образец ММКМ:  
а — общий вид полученного образца,  $\times 2$ ;  
б — образец в поперечном разрезе,  $\times 3$

Металлографические исследования полученных образцов алюмоматричных композитных материалов (АМКМ) после травления в 4 % спиртовом растворе  $\text{HNO}_3$  с применением оптической микроскопии показывают наличие распределенных частиц металлического порошка стали 10P6M5 в объеме алюминиевой матрицы (рис. 5). Формирование такого строения структуры АМКМ происходит при одновременном воздействии короткого импульса электрического тока и механического давления, в результате чего металлический порошок стали 10P6M5 внедряется в расплавленную гранулу алюминия. Так как температура плавления армирующих частиц (1320–1350 °С) намного выше температуры плавления алюминия (660 °С), то можно предположить, что взаимодействие между компонентами АМКМ происходит путем растворения армирующих частиц в расплаве алюминия [6].

Структура АМКМ, полученного по «Режиму 1», характеризуется наличием большей объемной доли армирующих частиц (рис. 5а) по отношению к структуре ММКМ, полученному по «Режиму 2» (рис. 5б). Такая разница структуры очевидна и связана с повышением температуры прессования по «Режиму 2» выше температуры плавления алюминия, что приводит к частичному растворению армирующих частиц, уменьшению их размера, а в случае если частица имела малый размер, полному ее растворению. На рисунке 6 в объеме матрицы наблюдаются границы в форме шестигранных фигур, внутри которых расположены армирующие частицы. Данная структура формируется в результате высокоэнергетического воздействия импульса тока высокой плотности и давления. Известно, что самоорганизация структур, которые формируются в условиях, далеких от равновесных, идет по механизмам, подчиняющимся законам синергетики [7].



а



б

Рис. 5. Строение АМКМ, полученного по:  
а — Режиму 1; б — Режиму 2

Также стоит отметить наличие «оболочки» вокруг армирующих частиц, которые могут являться зоной активного растворения частиц металлического порошка в матрице АМКМ. Граница раздела «матрица — армирующие частицы» имеет четко выраженное строение, без наличия каких-либо дефектов, что подтверждает характер взаимодействия между компонентами.

Для исследования структуры матрицы полученного ММКМ травление осуществлялось в 1 %-ном спиртовом растворе HF (рис. 7).

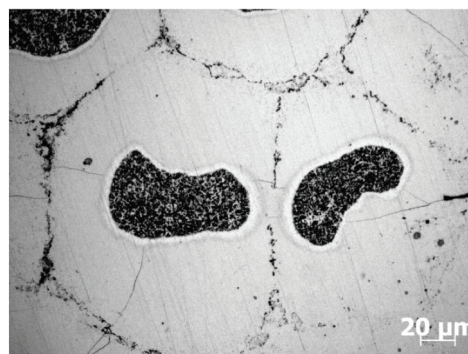


Рис. 6. Межзеренные границы АМКМ

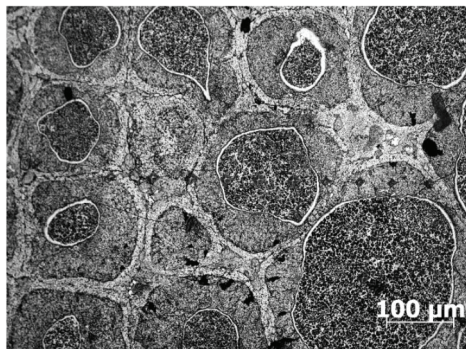


Рис. 7. Структура АМКМ после травления

Полученная микроструктура характеризуется наличием нескольких четко выраженных зон, форми-

рование которых обусловлено различной степенью растворения армирующих частиц в алюминиевой матрице.

#### Заключение

В настоящее время разработка ММКМ на основе алюминия и его сплавов является одним из основных направлений развития современного машиностроения. Проведенные в данной работе исследования показали возможность получения ММКМ на основе алюминия по технологии электроимпульсного спекания с применением армирующих частиц на основе железа. Выявлены особенности микроструктуры АМКМ и определен характер взаимодействия компонентов.

#### Библиографический список

1. Prusov E.S. Modern Methods of Metal Matrix Composite Alloys Production and New Approaches to Realization of Reinforcing Scheme // *Machines, Technologies, Materials*. 2014. Vol. 1. P. 11–13.
2. Прусов Е.С., Панфилов А.А., Кечин В.А. Современные методы получения литых композиционных сплавов // *Литейщик России*. 2011. № 12. С. 35–40.
3. Бабкин В.Г., Черепанов А.И., Углев В.А. Теория и технология литейных композиционных материалов: электрон. учеб.-метод. комплекс дисциплины, 2008 // Библиотечно-издательский комплекс СФУ. URL: <http://www.sfu-kras.ru/bik.sfu-kras.ru/elib/view?id=BOOK1-621.74/%D0%91126-499991> (дата обращения: 20.10.2023).

4. Панфилов А.А., Прусов Е.С., Кечин В.А. *Металлургия алюмоматричных композиционных сплавов*. Владимир: Изд-во ВлГУ, 2017. 192 с.
5. Adebisi A.A., Maleque M.A., Rahman M.M. Metal Matrix Composite Brake Rotor: Historical Development and Product Life Cycle Analysis // *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*. 2011. Vol. 4. P. 471–480. DOI: 10.15282/ijame.4.2011.8.0038
6. Браутман Л., Крок Р. Композиционные материалы. Поверхности раздела в металлических композитах. М.: Мир, 1978. Т. 1. 438 с.
7. Иванова В.С., Баланкин А.С., Бунин И.Ж., Оксогоев А.А. Синергетика и фракталы в материаловедении. М.: Наука, 1994. 383 с.

#### References

1. Prusov E.S. Modern Methods of Metal Matrix Composite Alloys Production and New Approaches to Realization of Reinforcing Scheme. *Machines, Technologies, Materials*. 2014. Vol. 1. P. 11–13.
2. Prusov E.S., Panfilov A.A., Kechin V.A. Modern Methods of Obtaining Cast Composite Alloys. *Foundry of Russia*. 2011. No 12. P. 35–40. (In Russ.).
3. Babkin V.G., Cherepanov A.I., Uglev V.A. Theory and Technology of Foundry Composite Materials, 2008. *Library and Publishing Complex of Siberian Federal University*. URL: <http://www.sfu-kras.ru/bik.sfu-kras.ru/elib/view?id=BOOK1-621.74/%D0%91126-499991/> (accessed: 20.10.2023). (In Russ.).

4. Panfilov A.A., Prusov E.S., Kechin V.A. *Metallurgy of Aluminum-Matrix Composite Alloys*. Vladimir: Publishing House of the Moscow State University, 2017. 192 p. (In Russ.).
5. Adebisi A.A., Maleque M.A., Rahman M.M. Metal Matrix Composite Brake Rotor: Historical Development and Product Life Cycle Analysis. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*. 2011. Vol. 4. P. 471–480. DOI: 10.15282/ijame.4.2011.8.0038
6. Brautman L., Krok R. *Composite Materials. Interface Surfaces in Metal Composites*. Moscow: Mir, 1978. Part 1. 438 p. (In Russ.).
7. Ivanova V.S., Balankin A.S., Bunin I.Zh., Oxogoev A.A. *Synergetics and Fractals in Materials Science*. Moscow: Nauka, 1994. 383 p. (In Russ.).

#### Информация об авторах

**О.А. Масанский**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой материаловедения и технологии обработки материалов, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия;

**А.М. Токмин**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры материаловедения и технологии обработки материалов, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия;

**А.Г. Анисимов**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, исполняющий обязанности заведующего лабораторией Синтеза композиционных материалов, Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, Россия;

**С.О. Масанский**, студент, бакалавр механико-технологического факультета, Политехнический институт, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.

*Information about the authors*

**O.A. Masanskii**, Candidate of Sciences in Technology, Associate Professor, Head of the Department of Materials Science and Technology of Materials Processing, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia;

**A.M. Tokmin**, Candidate of Sciences in Technology, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Materials Science and Technology of Materials Processing, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia;

**A.G. Anisimov**, Candidate of Sciences in Physics and Mathematics, Senior Researcher, Acting Head of the Laboratory of Synthesis of Composite Materials, Lavrentiev Institute of Hydrodynamics SB RAS, Novosibirsk, Russia;

**S.O. Masanskii**, Undergraduate Student of the Faculty of Mechanics and Technology of the Polytechnic Institute, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.