Известия Алтайского государственного университета. 2025. № 1 (141). С. 41–47.
Izvestiya of Altai State University. 2025. No 1 (141). P. 41–47.

Научная статья
УДК 621.762:669.715, 538.95
DOI: 10.14258/izvasu(2025)1-05

Получение алюмоматричных композитных материалов Al-SiC в условиях высокоэнергетического воздействия

Олег Александрович Масанский[1], Александр Михайлович Токмин[2], Семен Олегович Масанский[3], Александр Кириллович Капчук[4], Наталья Вячеславовна Ларионова[5]

[1]Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия, pi775@yandex.ru
[2]Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия, tam550@yandex.ru
[3]Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия, masansky.sema2002@gmail.com
[4]Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия, popandopulo2018@gmail.com
[5]Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия, lnv2002@yandex.ru

Original article

Production of Aluminum–Matrix Composite Al-SiC Materials under High-Energy Exposure Conditions

Oleg A. Masanskii[1], Alexander M. Tokmin[2], Semyon O. Masanskii[3], Alexandr K. Kapchuk[4], Nataliya V. Larionova[5]

[1]Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia, pi775@yandex.ru
[2]Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia, tam550@yandex.ru
[3]Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia, masansky.sema2002@gmail.com
[4]Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia, popandopulo2018@gmail.com
[5]Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia, lnv2002@yandex.ru

Аннотация. Алюмоматричные композиционные материалы (АМКМ) конструкционного и функционального назначения находят все более широкое применение в различных отраслях промышленности: автомобильной, авиа- и ракетостроении, судостроительной и других, что обусловлено повышенными характеристиками физико-механических и эксплуатационных свойств.

Применение технологий, предусматривающих высокоэнергетическое воздействие в процессе структурообразования, позволяет управлять макро- и микроструктурой, прочностными и эксплуатационными характеристиками изделий различного назначения. Современное представление об эффективном управлении свойствами материалов основывается на возможности создания условий, которые могут радикально влиять на процессы самоорганизации структур.

В статье приведены результаты исследования возможности получения металломатричного композитного материала на основе алюминия, армированного

Abstract. There are many areas of industry, like automotive, aviation, rocket engineering, shipbuilding, and others, where aluminum matrix composite materials (AMCM) are widely used for structural and functional purposes due to their enhanced physical, mechanical, and operational properties. Technologies that use high-energy effects during the structure formation processes enable control the macro- and microstructure, strength, and performance characteristics of products for various purposes. The modern idea of effective management of material properties follows the possibility to create specific conditions that can affect radically the self-organization processes of material structures.

The article presents the results of a study that demonstrates the possibility of obtaining the metal matrix composite Al-based material reinforced with silicon carbide (SiC) particles under conditions of high-energy induction. It is shown that production process conditions influence the formation of the resulting aluminum matrix composite material structure.

© Масанский О.А., Токмин А.М., Масанский С.О., Капчук А.К., Ларионова Н.В., 2025

частицами карбида кремния (SiC) в условиях высокоэнергетического индукционного воздействия. Показано влияние технологических режимов на формирование структуры полученного алюмоматричного композитного материала.

Ключевые слова: композитные материалы, алюмоматричные композитные материалы, армирующие частицы, индукционный нагрев, карбид кремния

Для цитирования: Масанский О.А., Токмин А.М., Масанский С.О., Капчук А.К., Ларионова Н.В. Получение алюмоматричных композитных материалов Al-SiC в условиях высокоэнергетического воздействия // Известия Алтайского государственного университета. 2025. № 1 (141). С. 41–47. DOI: 10.14258/izvasu(2025)1-05

Keywords: composite materials, aluminum matrix composite materials, reinforcing particles, induction heating, silicon carbide

For citation: Masanskii O.A., Tokmin A.M., Masanskii S.O., Kapchuk A.K., Larionova N.V. Production of Aluminum–Matrix Composite Al-SiC Materials under High-Energy Exposure Conditions. *Izvestiya of Altai State University.* 2025. No 1 (141). P. 41–47. (In Russ.). DOI: 10.14258/izvasu(2025)1-05

Введение

Алюмоматричные композиционные материалы (АМКМ) конструкционного и функционального назначения находят все более широкое применение в различных отраслях промышленности: автомобильной, авиа- и ракетостроении, судостроительной и других, что обусловлено повышенными характеристиками физико-механических и эксплуатационных свойств [1]. АМКМ относятся к литым композиционным материалам, состоящим из алюминиевой основы (матрицы) с равномерно или заданным образом распределенными в ней армирующими частицами экзогенного и/или эндогенного происхождения [2, 3].

Создание гетерогенных металлических материалов с заданным комплексом физико-механических свойств может быть реализовано благодаря применению комплексного подхода, сочетающего получение определенного химического состава, технологию получения и упрочняющую обработку. В результате этого возможно получение требуемого фазового состава и определенного структурного состояния композитных материалов. Свойства сплавов определяются не только химическим составом и микроструктурой, но и в значительной степени типом, размерами, формой и характером распределения фаз различной природы и происхождения [1, 4, 5].

Применение технологий, предусматривающих высокоэнергетическое воздействие в процессе структурообразования, позволяет управлять макро- и микроструктурой, прочностными и эксплуатационными характеристиками изделий различного назначения. Современное представление об эффективном управлении свойствами материалов основывается на возможности создания условий, которые могут радикально влиять на процессы самоорганизации структур [4, 6].

Целью создания таких композитов является получение материала с новыми заданными свойствами и характеристиками, отличными от свойств и характеристик исходных компонентов. Усиливающими или армирующими компонентами чаще всего являются порошкообразные, в том числе и наночастицы или волокнистые материалы различной природы [7]. Армирующие частицы могут быть как искусственно введенными (экзогенно-армированные композиты), так и синтезированными непосредственно в матричном расплаве в процессах плавки и литья (эндогенно-армированные композиты) [8].

Разработка новых технологий получения металломатричных композитных материалов (ММКМ) направлена на повышение экономической эффективности за счет снижения удельного веса деталей машин и оборудования, повышение прочностных характеристик, снижение линейного коэффициента температурного расширения, повышение жаропрочности, коррозионно- и износостойкости, тепло- и электропроводности. Согласно проведенным исследованиям [9], доля литых композитных материалов на основе алюминия в общемировом объеме составляет более 50 %. Наибольшее применение находят материалы, армированные SiC, — около 19 % и Al_2O_3 — около 10 %.

Применяемые в настоящее время технологии получения ММКМ: механическое замешивание, пропитка матричного материала, ультразвуковое перемешивание, прессование и прокатка, инжекция струей инертного газа и др. не имеют стабильных результатов, а в некоторых случаях применимы только для конкретных материалов. Поэтому разработка новых технологий получения ММКМ является актуальной задачей.

Целью настоящей работы является исследование возможности получения АМКМ Al-SiC в условиях высокоэнергетического индукционного воздействия. Провести исследования структуры и свойств полученных образцов АМКМ.

Материалы и методы исследования

Для получения экспериментальных образцов АМКМ использовали гранулированный алюминий технической чистоты марки А1 (ТУ 6-09-3742-87) и SiC в виде порошка с размером фракции F120 в качестве армирующих частиц. Методы проведения исследования полученных образцов АМКМ: металлографические с применением оптического микроскопа Carl Zeiss Axio Vision; анализ твердости на приборе ТР5006 при нагрузке 980,7 Н, в качестве индентора был использован шарик из закаленной стали D=5 мм. Значение твердости определялось по формуле:

$$HB = \frac{2P}{\pi D\left(D - \sqrt{D^2 - d^2}\right)} \text{ МПа}, \quad (1)$$

где P — нагрузка, D — диаметр шарика, d — диаметр отпечатка.

Полученные результаты и их обсуждение

Образцы АМКМ были получены в условиях высокоэнергетического индукционного воздействия с применением высокочастотной индукционной установки транзисторного типа УВГ2-25 мощностью 25 кВт. Общий вид установки приведен на рисунке 1. Плавление шихты осуществлялось в керамическом тигле, который размещался внутри индуктора (см. рис. 1).



а *б*

Рис. 1. Высокочастотная индукционная установка УВГ2-25:
а — общий вид; б — тигель с расплавом, размещенный в индукторе

Индукционный нагрев металлов основан на двух физических законах: законе электромагнитной индукции Фарадея — Максвелла и законе Джоуля — Ленца. Получение расплавов металлических материалов в условиях высокоэнергетического индукционного воздействия заключается в нагреве металла вихревыми токами, которые возбуждаются в нем переменным электромагнитным полем индуктора. На рисунке 2 приведена схема получения расплава в условиях высокоэнергетического индукционного воздействия.

Кроме того, электромагнитное поле, взаимодействуя с вихревыми токами, создает объемную силу Лоренца, которая способствует перемешиванию расплава [10]. Интенсивность перемешивания расплава увеличивается с повышением циклической частоты. При этом повышается и скорость нагрева за счет уменьшения толщин скин-слоя [11].

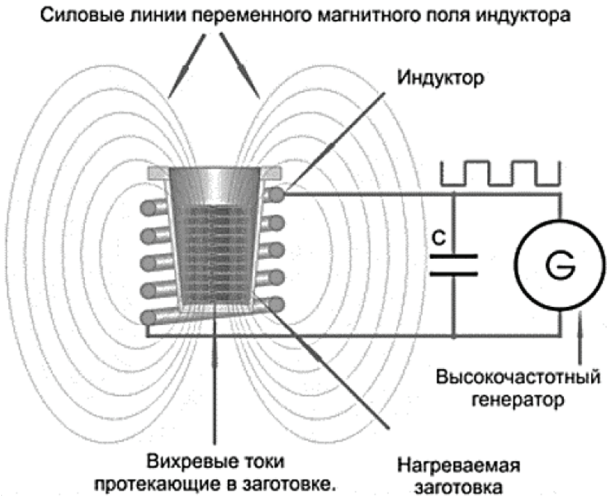


Рис. 2. Схема получения расплава в условиях высокоэнергетического индукционного воздействия

$$\Delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu\mu_0}}\ , \text{м} \qquad (2)$$

где $\omega=2\pi\cdot f$ — циклическая частота генератора, μ — магнитная проницаемость вещества, μ_0 — магнитная постоянная, ρ — удельное сопротивление вещества.

Повышение скорости нагрева за счет снижения толщины скин-слоя обусловлено тем, что для получения матричного расплава АМКМ был использован гранулированный алюминий (диаметр гранул 7–12 мм, толщина 2–3 мм), что значительно увеличивает удельную площадь нагреваемой поверхности, а, следовательно, и скорость нагрева.

Получение экспериментальных образцов осуществлялось по двум методам:

1. Армирующий компонент вводился в расплав алюминия при помощи «колокола», после чего производилось предварительное механическое замешивание в течение 15–20 секунд.

2. Исходные материалы для получения экспериментальных образцов перед плавлением подвергались предварительному брикетированию (без подогрева) на гидравлическом прессе с усилием 50 кН. Общий вид полученных брикетов приведен на рисунке 3.

Содержание армирующего компонента (SiC) составляло 15 % (по массе).

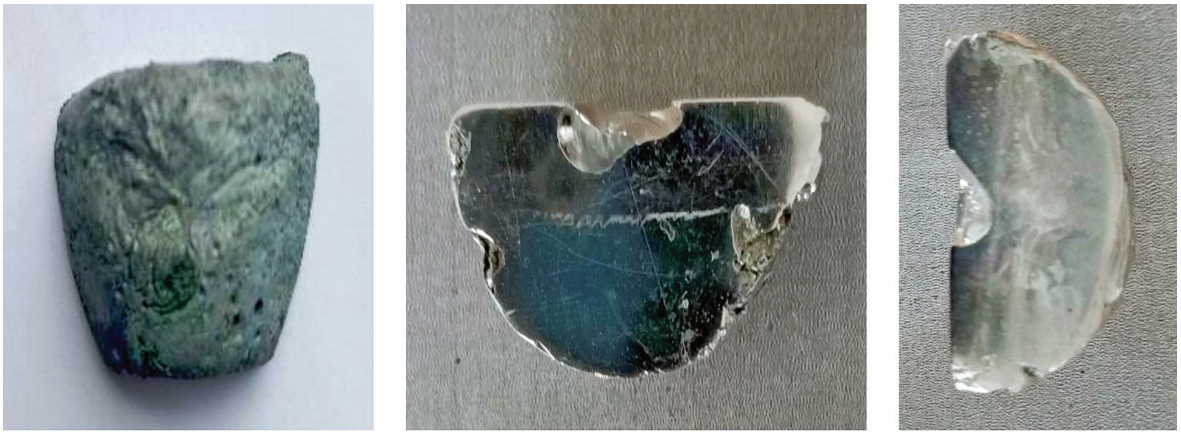
Брикетирование шихтового материала позволяет распределить армирующий компонент (SiC) по объему АМКМ и исключить этап механического ввода армирующих частиц после расплавления материала матрицы. Введение армирующего компонента в расплав матричного материала при помощи «колокола» с последующим механическим перемешиванием может сопровождаться газонасыщением расплава и снижением механических и эксплуатационных свойств.

В ходе выполнения работы частота тока уменьшалась с 48 кГц до 38 кГц. После полного расплавления шихтового материала при частоте тока 48 кГц перемешивание расплава осуществлялось в течение 0,5–1,5 мин при температуре 900–950 °С. С целью предотвращения осаждения частиц армирующей фазы SiC, плотность которой составляет 3,21 г/см^3, частоту понижали до 38 кГц, что приводило к снижению температуры расплава, близкой к температуре ликвидус алюминия, при этом перемешивание расплава продолжалось. После выключения индуктора полученный расплав остается в тигле до полного охлаждения.



Рис. 3. Общий вид брикета после прессования Al-SiC

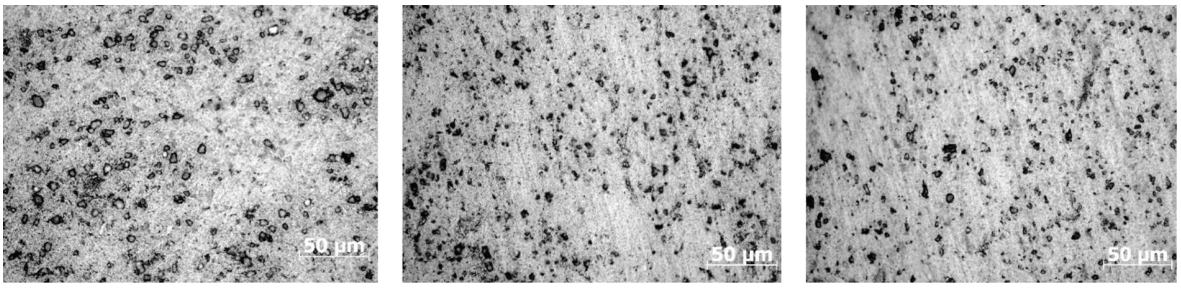
Образцы для проведения исследований вырезались из середины слитка полученного АМКМ в продольном и поперечном сечении (рис. 4).



а *б* *в*

Рис. 4. Образцы для проведения исследований:
а — общий вид; б — в продольном сечении; в — в поперечном сечении

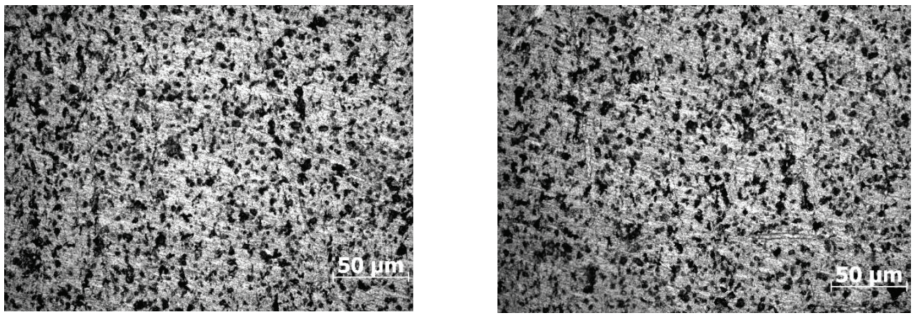
Микроструктура нетравленых АМКМ, полученных введением армирующего компонента в расплав матричного материала при помощи «колокола» с последующим механическим перемешиванием, приведена на рисунке 5. Полученная структура характеризуется наличием равномерно распределенного армирующего компонента (темные частицы) по объему матрицы (серый фон).



а *б* *в*

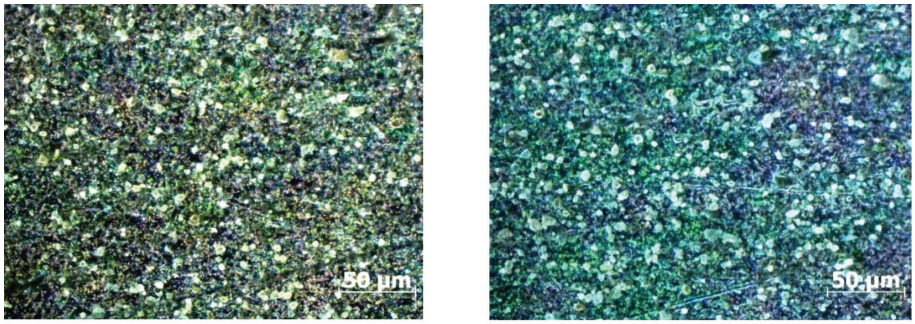
Рис. 5. Структура АМКМ с механическим замешиванием:
а — верхняя часть слитка; б — средняя часть слитка; в — нижняя часть слитка

Микроструктура АМКМ, полученных с применением предварительно брикетированных компонентов, также показывает равномерность распределения армирующих частиц по объему матричного материала, рисунки 6, 7.



а *б*

Рис. 6. Структура АМКМ с предварительным брикетированием:
а — верхняя часть слитка; б — нижняя часть слитка



а *б*

Рис. 7. Структура АМКМ с предварительным брикетированием в поляризованном свете (светлые частицы — SiC): а — верхняя часть слитка; б — нижняя часть слитка

В структуре полученных экспериментальных образцов наблюдается разница объемной доли армирующего компонента (см. рис. 5, 6). Это связано с тем, что введение армирующего компонента при помощи «колокола» с последующим механическим замешиванием приводит к образованию конгломератов SiC, которые частично смешиваются с оксидной пленкой алюминия и поднимаются на поверхность расплава, не участвуя в формировании структуры АМКМ. Предварительное брикетирование исключает этап принудительного распределения карбида кремния по объему расплава.

Твердость экспериментальных образцов АМКМ, полученных методом механического замешивания, составляет 195–220 МПа, а с применением предварительного брикетирования 240–260 МПа. Разница в полученных значениях твердости объясняется различной долей армирующей фазы в структуре АМКМ. Полученные результаты показывают, что введение армирующих частиц карбида кремния приводит к значительному повышению твердости (твердость алюминия марки А1 составляет 20 МПа). Это очевидно, так как твердость карбида кремния составляет 9–9,5 единиц по шкале Мооса, что эквивалентно 32 000 МПа. Твердость одного из наиболее широко применяемых в различных отраслях промышленности сплавов АМг5 составляет 70–75 МПа. Стоит отметить, что значение твердости является косвенным показателем предела прочности материала при статическом растяжении, а значит, прочностные характеристики полученных экспериментальных образцов выше, чем у материала АМг5.

Заключение

Результаты проведенных исследований показали возможность получения ММКМ на основе алюминия в условиях высокоэнергетического индукционного воздействия с применением в качестве армирующих частиц карбида кремния в виде порошка. Металлографические исследования показали равномерность распределения армирующих частиц по объему композитного материала. Предварительное брикетирование исходных материалов позволяет исключить этап механического замешивания и способствует сохранению большей доли армирующего компонента SiC в структуре полученного композита, что приводит к увеличению твердости. В полученных экспериментальных образцах АМКМ разница в твердости в зависимости от доли армирующего компонента составляет до 30 %.

Библиографический список

1. 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

2. 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.

3. Прусов Е.С., Панфилов А.А., Кечин В.А. Современные методы получения литых композиционных сплавов // Литейщик России. 2011. № 12. С. 35–40.

4. Масанский О.А. Получение слоистого композиционного материала с регулируемой структурой и свойствами : дис. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2012. 126 с.

5. Кабалдин, Ю.Г., Муравьев С.Н. Исследование кристаллизации металлов на основе подходов теории синергетики // Литейное производство. 2008. № 5. С. 2–6.

6. Masanskii O.A., Tokmin A.M., Kazakov V.S., et al. Production of Wear-Resistant Composite Materials by the Method of High-Energy Induction Impact: научное издание // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2021. Vol. 16. No 1. P. 14–19.

7. Бабкин В.Г., Черепанов А.И., Углев В.А. Теория и технология литейных композиционных материалов : элект-

рон. учеб.-метод. комплекс дисциплины. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2008. https://bik.sfu-kras.ru/elib/view?id=BOOK1-621.74/%D0%91126-499991

8. Панфилов А.А., Прусов Е.С., Кечин В.А. Металлургия алюмоматричных композиционных сплавов. Владимир: Изд-во ВлГУ, 2017. 192 с.

9. 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.

10. Браутман Л., Крок Р. Композиционные материалы. Поверхности раздела в металлических композитах. М.: Мир, 1978. Т. 1. 438 с.

11. Ткачев В.Н., Фиштейн Б.М., Казинцев Н.В., Алдырев Д.А. Индукционная наплавка твердых сплавов. М.: Машиностроение, 1970. 184 с.

References

1. Masanskii O.A., Tokmin A.M., Anisimov A.G., Masanskii S.O. Production of Aluminomatric Composite Mmaterials Using Electric Pulse Sintering Technology. *Izvestiya of the Altai State University*. 2024. No 1 (135). P. 37–42. (In Russ.). DOI: 10.14258/izvasu(2024)1-04.

2. 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.

3. 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.).

4. Masansky O.A. *Obtaining a Layered Composite Material With a Controlled Structure and Properties:* Ph. D. thesis. Krasnoyarsk, 2012. 126 p. (In Russ.).

5. Kabaldin Yu.G., Muraviev S.N. Investigation of Metal Crystallization Based on the Approaches of the Theory of Synergetics. *Foundry Production*. 2008. No 5. P. 2–6. (In Russ.).

6. Masanskii O.A., Tokmin, A.M., Kazakov V.S., et al. Production of Wear-Resistant Composite Materials by the Method of High-Energy Induction Impact: scientific publication. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2021. Vol. 16. No 1. P. 14–19.

7. Babkin V.G., Cherepanov A.I., Uglev V.A. *Theory and Technology of Foundry Composite Materials: Electron. Studies. Method. the Complex of Discipline.* Krasnoyarsk, Siberian Federal University, 2008. https://bik.sfu-kras.ru/elib/view?id=BOOK1-621.74/%D0%91126-499991. (In Russ.).

8. Panfilov A.A., Prusov E.S., Kechin V.A. *Metallurgy of Aluminum-Matrix Ccomposite Alloys.* Vladimir: Izd-vo VlGU, 2017. 192 p. (In Russ.).

9. 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.

10. Brautman L., Krok R. *Composite Materials. Interface Surfaces in Metal Composites.* M.: Mir, 1978. Vol. 1. 438 p. (In Russ.).

11. Tkachev V.N., Fishtein B.M., Kazintsev N.V., Aldyrev D.A. *Induction Surfacing of Hard Alloys.* M.: Mashinostroenie, 1970. 184 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;

С.О. Масанский, магистрант Института цветных металлов, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия;

А.К. Капчук, магистрант Института цветных металлов, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия;

Н.В. Ларионова, кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения и технологии обработки материалов, 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;

S.O. Masanskii, Master Student of the Institute of Non-Ferrous Metals, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia;

A.K. Kapchuk, Master Student of the Institute of Non-Ferrous Metals, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia;

N.V. Larionova, Candidate of Sciences in Technology, Associate Professor of the Department of Materials Science and Technology of Materials Processing, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.