

УДК 621.762

DOI dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2017-4-29-36

Разработка технологии получения алюмоматричного литого композиционного материала с помощью синтеза упрочняющей фазы оксида алюминия в расплаве алюминия

© 2017 г. **Е.А. Чернышов, А.Д. Романов, Е.А. Романова, В.В. Мыльников**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (НГТУ)

Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет (НГАСУ)

Статья поступила в редакцию 12.10.16 г., доработана 16.03.17 г., подписана в печать 20.03.17 г.

В настоящее время ответственные детали и узлы, изготовленные из традиционных материалов, не всегда удовлетворяют возросшим требованиям конструкторов и условиям эксплуатации. Одним из решений данной проблемы являются разработка и применение дисперсно-упрочненных композиционных материалов с металлической матрицей. В работе на основе информационно-аналитического обзора предложена новая технология создания дисперсно-упрочненного композиционного материала на основе алюминия. Изложены особенности разрабатываемой технологии, приведены макро- и микроструктуры и механические характеристики образцов в литом состоянии. Синтез упрочняющих частиц непосредственно в расплаве позволяет получать композиты в одну стадию и обеспечивать термодинамическую устойчивость, плотный контакт и хорошую адгезию между матрицей и упрочняющей фазой. Достигнутые размеры частиц твердой фазы внедрения находятся в пределах от 3 мкм до 2 мм. Изучение структурно-фазового состояния полученного материала проводили с использованием методов оптической металлографии и рентгеноструктурного анализа (дифрактомер «Дрон-2»). Микроструктуру исследовали на микроскопе «Keyence VHX-1000». Твердость образцов определяли на ТКС-1М, микротвердость – на ПМТ-3 и «HVM Shumadzu», предел прочности – на универсальных разрывных машинах ZD 10/90 и УМЭ-10ТМ, ударную вязкость – на маятниковом копре МК-30а. Установлено что варьирование размера и содержания упрочняющей фазы позволяет изменять механические свойства литого металла в широких пределах. Применение предлагаемой технологии позволит существенно снизить временные и экономические затраты. По результатам оценочного расчета ожидается уменьшение стоимости получения дисперсно-упрочненного композиционного материала.

Ключевые слова: дисперсно-упрочненный материал, металломатричный композитный материал, алюминий, оксид алюминия, мелкодисперсная тугоплавкая частица, упрочняющая фаза, технология, свойства, структура.

Чернышов Е.А. – докт. техн. наук, профессор кафедры металлургических технологий и оборудования НГТУ им. Р.Е. Алексеева (603950, г. Н. Новгород, ул. Минина, 24). Тел.: (831) 436-03-02. E-mail: nil_st@nntu.ru.

Романов А.Д. – инженер научно-исследовательской лаборатории транспортных интеллектуальных систем (НИЛ ТИС), НГТУ им. Р.Е. Алексеева. E-mail: nil_st@nntu.ru.

Романова Е.А. – инженер НИЛ ТИС, НГТУ им. Р.Е. Алексеева. E-mail: nil_st@nntu.ru.

Мыльников В.В. – канд. техн. наук, доцент кафедры строительных технологий и оборудования НГАСУ (603095, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, 65). E-mail: mrmylnikov@mail.ru.

Для цитирования: Чернышов Е.А., Романов А.Д., Романова Е.А., Мыльников В.В. Разработка технологии получения алюмоматричного литого композиционного материала с помощью синтеза упрочняющей фазы оксида алюминия в расплаве алюминия // Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. 2017. No. 4. С. 29–36.
DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2017-4-29-36.

Chernyshov E.A., Romanov A.D., Romanova E.A., Mylnikov V.V.

Development of technology to produce cast aluminum matrix composite by alumina strengthening phase synthesis in aluminum melt

Currently, critical components and assemblies made of traditional materials not always meet the increased requirements of designers and service conditions. One of the solutions to this problem is the development and application of dispersion strengthened metal matrix composites. According to the information analysis review, the paper suggests a new technology to produce dispersion strengthened aluminum-based composite. Features of the developed technology are specified along with both sample macro- and microstructures and mechanical characteristics of as-cast samples. Strengthening particles are synthesized directly in the melt so that composites can be produced in a single stage with high thermodynamic stability, dense contact and good adhesion between the matrix and the strengthening phase. The reached particle sizes of a solid interstitial phase range from 3 μm to 2 mm. The structural and phase state of the produced material was studied using optical metallography and the X-ray diffraction analysis (Dron-2 diffractometer). The microstructure was investigated using the Keyence VHX-1000 microscope. Measurements were carried out using TKS-1M to determine microstructure, PMT-3 and HVM Shumadzu to determine hardness, ZD 10/90 and

UME-10TM universal tensile testers to determine tensile strength, and MK-30a pendulum impact tester to determine impact strength. It is found that the variation in the strengthening phase size and content allows changing mechanical properties of cast metal over a wide range. Estimate calculations show an expected reduction in the cost of dispersion strengthened composite production.

Keywords: dispersion strengthened composite, metal matrix composite, aluminum, alumina, finely-dispersed high-melting particle, strengthening phase, technology, properties, structure.

Chernyshov E.A. – Dr. Sci. (Tech.), prof., Department of metallurgical technology and equipment, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev (NNSTU) (603950, Russia, Nizhny Novgorod, Minina str., 24).
E-mail: nil_st@nntu.ru.

Romanov A.D. – engineer of Research laboratory of transport intelligent systems, NNSTU. E-mail: nil_st@nntu.ru.

Romanova E.A. – engineer of Research laboratory of transport intelligent systems, NNSTU. E-mail: nil_st@nntu.ru.

Mylnikov V.V. – Cand. Sci. (Tech.), associate prof., Department of building technology and equipment, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering (603095, Russia, Nizhny Novgorod, Il'inskaya str., 65).
E-mail: mrmynikov@mail.ru.

Citation: Chernyshov E.A., Romanov A.D., Romanova E.A., Mylnikov V.V. Razrabotka tekhnologii polucheniya alyumomatrichnogo litogo kompozitsionnogo materiala s pomoshch'yu sinteza uprochnyayushchei fazy oksida alyuminiya v rasplave alyuminiya. *Izv. vuzov. Poroshk. metallurgiya i funkts. pokrytiya*. 2017. No. 4. P. 29–36.
DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2017-4-29-36.

Введение

Развитие техники требует разработки новых материалов различного функционального назначения и технологий их получения, так как в настоящее время традиционные материалы уже не в полной мере могут удовлетворить новые запросы конструкторов. Довольно часто, согласно требованиям, предъявляемым к современной технике, необходимо повышение прочности и жесткости конструктивных материалов при одновременном снижении их массы. Решение данной проблемы возможно путем создания и применения нового класса материалов — композиционных с металлической матрицей. Их главным преимуществом по сравнению с традиционными конструктивными материалами является резкое повышение прочностных показателей, жесткости, модуля упругости, жаропрочности, стойкости против абразивного износа и образования различных трещин. Использование композиционных материалов обеспечивает качественный скачок в увеличении мощности двигателей, энергетических и транспортных установок, уменьшении массы машин и приборов [1–9]. Кроме того, перспективно применение дисперсно-упрочненного композиционного материала (ДУКМ) для баллистической защиты техники, так как повышение стойкости брони на основе алюминиевых сплавов только за счет легирования и термомеханической обработки ограничено [10, 11].

Отличительной особенностью ДУКМ является искусственный ввод в расплав упрочнителей. В качестве упрочняющей фазы используют дисперсные частицы оксидов, карбидов, нитридов и

других тугоплавких соединений, которые должны быть распределены на заданном расстоянии одна от другой в объеме литой заготовки будущей детали. Согласно литературным данным, в настоящее время ДУКМ получают различными способами: выделением частиц из пересыщенного раствора (дисперсионно-твердеющие сплавы), методом порошковой металлургии, в том числе механическим легированием [3, 6]. В работе [12] показан способ получения композитного материала системы Al—Al₂O₃ методом пластической деформации, а в [13] описан способ получения ДУКМ, насыщенного частицами нитрида алюминия по реакции Al₂O₃ + 3C + N₂ → 2AlN + 3CO. В работе [14] предложен способ получения керамического композита Al₂O₃—AlON—AlN, в [15] рассмотрен процесс продувки алюминиевого расплава водяным паром с получением легких деформируемых высококремнистых сплавов многоцелевого назначения, в [16] описан способ получения композита Al—TiC путем синтеза карбида титана непосредственно в расплаве Al—Ti с вводом в него углеводородсодержащего газа, развиваются и другие технологии.

Авторами [17] показано, что добавление механически активированных нанокристаллических частиц Al₂O₃ в алюминиевую матрицу повышает комплекс свойств материала, а в работе [18] установлено, что использование высокоэнергетического размалывания смесей Al—Al₂O₃ позволяет добиться значительного увеличения в композите твердости (на ~92 %) и предела прочности (на 57 %) по сравнению с чистым алюминием. При этом в

работе [19] выявлено, что размер критического зародыша больше размера наночастиц и, в отличие от известных способов суспензионного литья, они не являются центрами кристаллизации, а захватываются зародышем в процессе кристаллизации. Поэтому добавление именно нанокристаллических материалов может больше сказаться на стоимости, чем на служебных свойствах.

Однако высокая стоимость исходных порошковых материалов для получения ДУКМ является существенным сдерживающим фактором для широкого внедрения изделий из композиционных материалов [4, 5, 20].

Цель работы

Для снижения стоимости получения ДУКМ в НГТУ им. Р.Е. Алексеева разрабатывается технология, в основе которой лежит процесс взаимодействия расплава алюминия с кислородом. Данная технология опирается на результаты экспериментов по созданию воздухонезависимой энергетической установки с использованием высокометаллизированного безгазового топлива [21]. В ходе предварительных работ был проведен литературный и патентный поиск, который показал отсутствие прямых аналогов разрабатываемого процесса. После анализа результатов были поданы две заявки на патент, при экспертизе которых в Федеральном институте промышленной собственности (ФИПС) в качестве ближайших аналогов были предложены патенты RU 2441095 и JP 2008178907, не являющиеся прямыми аналогами. По рекомендации ФИПС заявки были преобразованы из «полезной модели» в «изобретение».

Методика исследований

Для проведения экспериментов по созданию дисперсно-упрочненного материала был спроектирован и изготовлен стенд для получения и раз-

ливки сплава заданного состава. В ходе опытов в качестве матричного материала использовали первичный алюминий (содержащий примеси, в основном Fe и Si) для исключения влияния легирующих добавок и изучения упрочнения композита только за счет частиц упрочняющей фазы.

Эксперименты проводили в цилиндрических тиглях (диаметр 45–50 мм, высота 80–100 мм и диаметр 75 мм, высота 120 мм). В тигель в расплав металла под давлением до 57 кПа из блока продувки подавалась кислородсодержащая газовая смесь (0–5 % азот, остальное кислород). Полученный расплав, содержащий от 5 до 40 % частиц Al_2O_3 [22], разливался в кокиль.

Установлено, что при увеличении насыщения частицами Al_2O_3 цвет поверхности отливок изменялся (рис. 1). На рис. 2, где приведена макроструктура отливки, наглядно видна граница раздела металл–шлак.

Необходимо отметить, что при насыщении расплава частицами свыше 25 % возможность разливки по традиционной технологии ограничена. Это связано как с уменьшением жидкотекучести расплава, так и с особыми высокотемпературными свойствами материала.

На рис. 3 показан тепловыделяющий элемент (ТВЭЛ) после испытания на аварийное разрушение [21], разрезанный и нагретый до 950 °С.

На рис. 4 представлена цилиндрическая заготовка, выполненная из ДУКМ, нагретая до 1050 °С, рез выполнялся ножом.

Изучение структурно-фазового состояния полученного материала проводили с использованием методов оптической металлографии (микроскоп «Keyence VHX-1000», Япония) и рентгеноструктурного анализа (дифрактомер «Дрон-2» — НПП «Буревестник», г. Санкт-Петербург). Микроструктуру исследовали на микроскопе «Keyence VHX-1000». Твердость образцов определяли на аппарате ТКС-1М (ПО «Точприбор», г. Иваново), микротвердость — с помощью приборов ПМТ-3 (ОАО «ЛОМО»,



Рис. 1. Опытные отливки

Увеличение концентрации частиц Al_2O_3 — слева направо

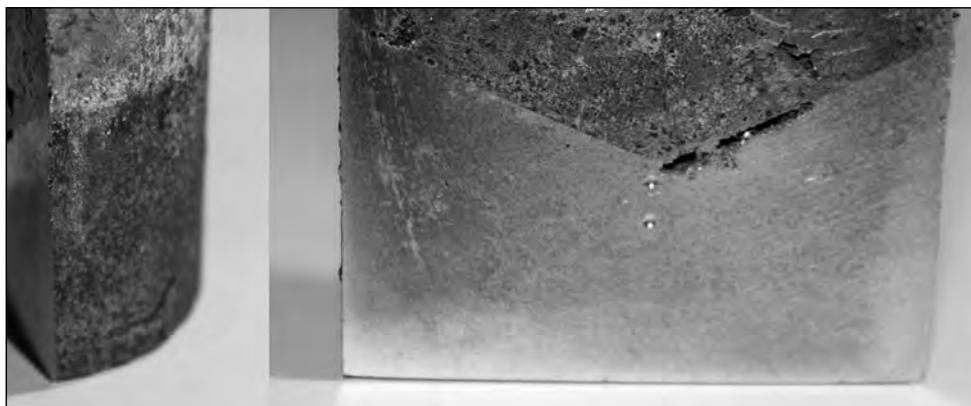


Рис. 2. Пример макроструктуры экспериментальной отливки

г. Санкт-Петербург) и «НМV Shumadzu» («Shimadzu Corp», Япония), предел прочности — на универсальных разрывных машинах ZD 10/90 (VEB «Thuringer Industrierwerk», Германия) и УМЭ-10ТМ (ПО «Точприбор», г. Иваново), ударную вязкость — маятниковым копром МК-30а (ПО «Точмашприбор», г. Армавир).

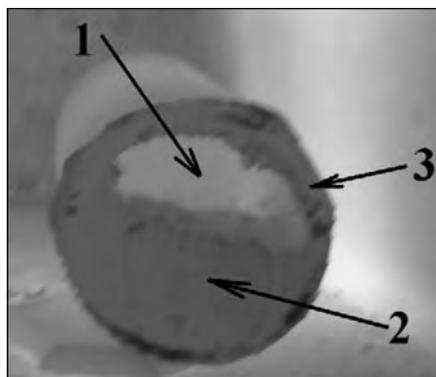


Рис. 3. Образец ТВЭЛ, нагретый до 950 °С
1 — отверстие для слива несгоревшего топлива (алюминий)
2 — алюминий, насыщенный частицами Al_2O_3
(рез на 150 мм ниже зоны аварийного разрушения)
3 — внешний чехол ТВЭЛ (сталь)



Рис. 4. Образец литого материала, нагретый до 1050 °С

Результаты и их обсуждение

В результате металлографических и рентгеноструктурных исследований установлено, что матрицей полученного металлокерамического материала является алюминий, основная фаза внедрения — оксид алюминия. Размер частиц и полнота протекания реакции окисления регулируются продолжительностью процесса и изменением конструктивных элементов блока продувки, а также условий кристаллизации. Достигнутые размеры твердой фазы внедрения находятся в пределах от 3 мкм до 2 мм, микроструктура образцов приведена на рис. 5, 6.

Измерения проводили при использовании программного обеспечения микроскопа «Keyence VHX-1000» с помощью функции «3 точки, лежащие на окружности»; на рис. 6 показано измерение твердости посредством прибора ПМТ-3. Видно практически равномерное распределение упрочняющей керамической фазы с небольшими

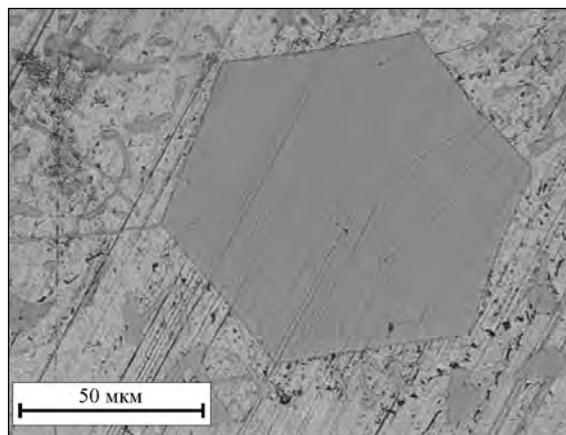


Рис. 5. Микроструктура полученного материала

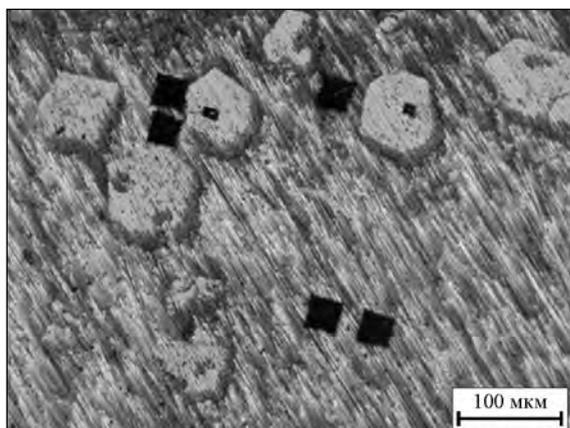


Рис. 6. Микроструктура полученного материала с измерением твердости с помощью ПМТ-3

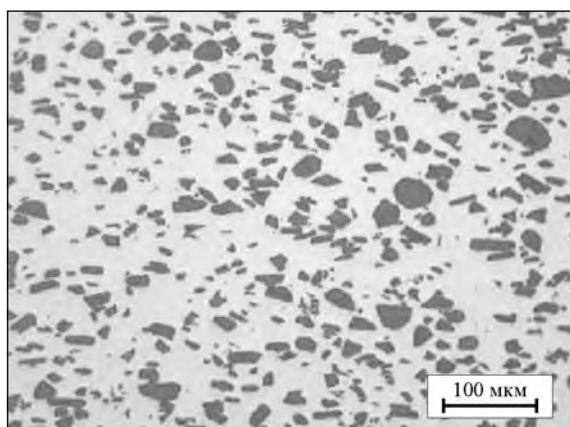


Рис. 7. Микроструктура аналога – материала «Duralcan W6D22A»

различиями в размере. При сравнении с микроструктурой материала «Duralcan W6D22A» (рис. 7), который содержит 22 % Al_2O_3 средним размером 20 мкм, наблюдается значительное различие в размере упрочняющих частиц.

Варьирование размера и содержания упрочняющей фазы позволяет в значительной степени

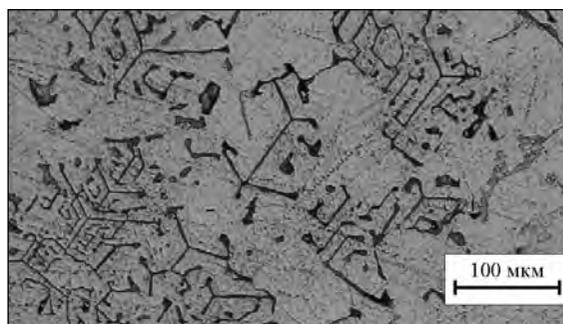


Рис. 8. Микроструктура материала с псевдодендритной структурой

изменять механические свойства получаемого изделия. При этом твердость материала в литом состоянии составляет 50–75 HRF, а микротвердость фазы внедрения превышает 480 НВ. Предел прочности в литом состоянии находится в диапазоне 150–185 МПа.

Упрочняющие частицы значительно увеличивают энергоемкость разрушения образца, ударная вязкость полученного материала, за счет изменения содержания фазы внедрения, варьируется в широких пределах: 23–85 Дж/см².

Особым направлением является технология создания материала с микроструктурой, показанной на рис. 8. Данная микроструктура получена при окислении кипящего алюминия, что характерно для горения ТВЭЛ, однако она трудно достижима в экспериментальных образцах малого диаметра (до 50 мм) вследствие значительного нагрева поверхности тигля.

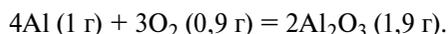
Заявленное снижение стоимости исходных материалов происходит за счет отказа от порошкообразных компонентов. Кроме того, аппаратная часть также значительно дешевле установок спекания, самораспространяющегося синтеза или механического легирования. Для сравнения приведем

Сравнение стоимости сплава, содержащего 30 % Al_2O_3 , и сплава, полученного из порошкообразных компонентов

Вариант	Особенность технологии	Исходные материалы			Стоимость сплава, руб./кг
		Компонент	Масса, кг	Стоимость, руб./кг	
1	Внесение порошкообразного Al_2O_3	Al	0,7	100	370
		Al_2O_3	0,3	1000	
2	Внутреннее окисление	Al	0,86	100	107
		O_2	0,15	140 (100 руб./м ³)	

расчет стоимости получения алюминиевого сплава, насыщенного Al_2O_3 (30 %).

Окисление алюминия осуществляется по реакции



Цена алюминия зависит от марки и состояния поставки (80—200 руб./кг), Al_2O_3 — от чистоты и размера частиц (340—5000 руб./кг), кислорода — от чистоты (60—150 руб./м³).

Заключение

Применение разрабатываемой технологии получения ДУКМ на основе окисления алюминия кислородом позволяет существенно снизить временные и экономические затраты, причем в зависимости от технической задачи и требуемых эксплуатационных характеристик возможна достаточно большая вариативность упрочняющей фазы без внесения существенных изменений в конструкцию установки. При этом непосредственно в расплаве синтезируются упрочняющие частицы, что позволяет получать композиты в одну стадию и обеспечивать термодинамическую устойчивость, плотный контакт и хорошую адгезию между матрицей и упрочняющей фазой. Степень насыщения расплава керамическими элементами регулируется временем реакции.

В ходе работы была подтверждена возможность создания ДУКМ на основе алюминия, полученного продувкой расплава кислородсодержащей газовой смесью. Проведенные исследования показали возможность существенного варьирования механических свойств материала.

Ожидается, что данная технология позволит значительно сократить издержки при производстве композиционного материала.

Литература

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиац. материалы и технологии*. 2012. No. 5. С. 7—17.
2. Луц А.Р., Галочкина И.А. Алюминиевые композиционные сплавы — сплавы будущего. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2013.
3. Чернышова Т.А., Курганова Ю.А., Кобелева Л.И., Болотова Л.К., Калашиников Е.А., Катин И.В., Панфилов А.В., Панфилов А.А. Композиционные материалы с матрицей из алюминиевых сплавов, упрочненных частицами, для пар трения скольжения // *Конструкции из композ. материалов*. 2007. No. 3. С. 39—48.
4. Панфилов А.А., Прусов Е.С., Кечин В.А. Проблемы и перспективы развития производства и применения алюмоматричных композиционных сплавов // *Тр. Нижегород. гос. техн. ун-та им. Р.Е. Алексеева*. 2013. No. 2. С. 210—218.
5. Курганова Ю.А. Перспективы развития металломатричных композиционных материалов промышленного назначения // *Сервис в России и за рубежом*. 2012. No. 3 (30). С. 235—240.
6. Adebisi A.A., Maleque M.A., Rahman M.M. Metal matrix composite brake rotor: historical development and product life cycle analysis // *Int. J. Automot. Mech. Eng.* 2011. Vol. 4. P. 471—480
7. Mortensen A., Cornie J.A., Flemings M.C. Solidification processing of metal matrix composites // *JOM*. 1988. Vol. 40 (2). P. 12—19. DOI: 10.1007/BF03258826.
8. Geiger A.L., Walker J.A. The processing and properties of discontinuously reinforced aluminium composite // *JOM*. 1991. Vol. 43. P. 8—15. DOI: 10.1007/BF03221097.
9. Liu Yao-Hui, Du Jun, Yu Si-rong, Wang Wei. High temperature friction and wear behaviour of Al_2O_3 and/or carbon short fibre reinforced Al—12Si alloy composites // *Wear*. 2004. Vol. 256. P. 275—285. DOI: 10.1016/S0043-1648(03)00387-9.
10. Чернышов Е.А., Романов А.Д., Романова Е.А. Развитие материалов баллистической защиты на основе алюминиевых сплавов // *Загот. пр-ва в машиностроении*. 2015. No. 10. С. 43—47.
11. Kumar P. Vijaya, Madhusudhan G. Reddy, Srinivasa Rao K. Microstructure and pitting corrosion of armor grade AA7075 aluminum alloy friction stir weld nugget zone. Effect of post weld heat treatment and addition of boron carbide // *Defence Technol.* 2015. Vol. 11. P. 166—173. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.dt.2015.01.002>.
12. Комкова Т.Ю., Холин М.С., Чернышова П.И. Разработка композиционного материала системы Al— Al_2O_3 , получаемого методом пластической деформации // *Соврем. пробл. науки и образования*. 2015. No. 2. С. 164—168.
13. Chien Chon Chen, Chih Yuan Chen, Hsi Wen Yang, Yang Kuo Kuo, Jin Shyong Lin. Phase equilibrium in carbothermal reduction $Al_2O_3 \rightarrow AlN$ studied by thermodynamic calculations atlas // *J. Mater. Sci.* 2014. No. 1 (2). P. 30—37. DOI: 10.5147/ajms.2014.0172.
14. Vlasova M., Kakazey N., Rosales I., Krushinskaya L., Bykov A., Tomila T., Voitsehovskaya E., Vinokurov V. Synthesis of composite AlN—AlON— Al_2O_3 powders and ceramics

- prepared by high-pressure sintering // *Sci. Sinter.* 2010. No. 42. P. 283—295. DOI: 10.2298/SOS1003283V.
15. Афанасьев В.К., Герцен В.В., Долгова С.В., Мусохранов Ю.М., Попова М.В. О влиянии водяного пара на формирование свойств высококремнистых Al-сплавов // *Металлургия машиностроения.* 2015. No. 5. С. 17—22.
 16. Орлов А.В., Луц А.Р., Кандалова Е.Г., Макаренко А.Г. Технология получения композита Al—TiC из порошковых экзотермических смесей непосредственно в расплаве алюминия // *Загот. пр-ва в машиностроении.* 2005. No. 11. С. 54—61.
 17. Mohsen Hossein-Zadeh, Mansour Razavi, Omid Mirzaee, Razieh Ghaderi. Characterization of properties of Al—Al₂O₃ nano-composite synthesized via milling and subsequent casting // *J. King Saud Univ. — Eng. Sci.* 2013. No. 25. P. 75—80. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jksues.2012.03.001>.
 18. Dinesh Kumar Koli, Geeta Agnihotri, Rajesh Purohit. Properties and characterization of Al—Al₂O₃ composites processed by casting and powder metallurgy routes (Review) // *Int. J. Latest Trends Eng. Technol. (IJLTET).* 2013. Vol. 2. Iss. 4. P. 486—493.
 19. Анисимов О.В. Технология получения композиционных материалов на основе алюминия, упрочненных дисперсными наночастицами ZrO₂ и SiC в поле центробежных сил центрифуги: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: МАМИ, 2012.
 20. McDanel D.L., Signorelli A.R. Evaluation of low cost aluminum composites for aircraft engine structural applications. NASA Tech. Memo. No. 83357. Washington, DC, 1983.
 21. Чернышов Е.А., Романова Е.А., Романов А.Д. Разработка тепловыделяющего элемента на основе высокометаллизованного безгазового топлива // *Вестн. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение.* 2015. No. 6 (105). С. 74—81.
 22. Чернышов Е.А., Мыльников В.В., Мыльникова М.В., Романов А.Д., Романова Е.А. Создание металлокерамических элементов баллистической защиты с применением керамики на основе алюминия // *Соврем. наукоемкие технологии.* 2014. No. 4. С. 97—100.
 2. Luts A.R., Galochkina I.A. Alyuminiyevye kompozitsionnye splavy — splavy budushchego [Aluminum composite alloys — future alloys.] Samara: Samarskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2013.
 3. Chernyshova T.A., Kurganova Yu.A., Kobeleva L.I., Bolotova L.K., Kalashnikov E.A., Katin I.V., Panfilov A.V., Panfilov A.A. Kompozitsionnye materialy s matritsei iz alyuminiyevykh splavov, uprochnennykh chastitsami, dlya par treniya skol'zheniya [Composite materials with a matrix from the aluminum alloys strengthened by particles for couples of a sliding friction]. *Konstruktivnykh iz kompozitsionnykh materialov.* 2007. No. 3. P. 39—48.
 4. Panfilov A.A., Prusov E.S., Kechin V.A. Problemy i perspektivy razvitiya proizvodstva i primeneniya alyumomatrichnykh kompozitsionnykh splavov [Problema and prospect of development of production and application the alyumomatrichnykh of composite alloys]. *Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. R.E. Alekseeva.* 2013. No. 2. P. 210—218.
 5. Kurganova Yu.A. Perspektivy razvitiya metallomatrichnykh kompozitsionnykh materialov promyshlennogo naznacheniya [Prospects of development of metalmatrix composite materials of industrial function]. *Servis v Rossii i za rubezhom.* 2012. No. 3. P. 235—240.
 6. Adebisi A.A., Maleque M.A., Rahman M.M. Metal matrix composite brake rotor: historical development and product life cycle analysis. *Int. J. Automot. Mech. Eng.* 2011. Vol. 4. P. 471—480
 7. Mortensen A., Cornie J.A., Flemings M.C. Solidification processing of metal matrix composites. *JOM.* 1988. Vol. 40 (2). P. 12—19. DOI: 10.1007/BF03258826.
 8. Geiger A.L., Walker J.A. The processing and properties of discontinuously reinforced aluminium composite. *JOM.* 1991. Vol. 43. P. 8—15. DOI: 10.1007/BF03221097.
 9. Liu Yao-Hui, Du Jun, Yu Si-rong, Wang Wei. High temperature friction and wear behaviour of Al₂O₃ and/or carbon short fibre reinforced Al—12Si alloy composites. *Wear.* 2004. Vol. 256. P. 275—285. DOI: 10.1016/S0043-1648(03)00387-9.
 10. Chernyshov E.A., Romanov A.D., Romanova E.A. Razvitiye materialov ballisticheskoi zashchity na osnove alyuminiyevykh splavov [Development of ballistic protection materials based on aluminum alloys]. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroyeni.* 2015. No. 10. P. 43—47.
 11. Kumar P. Vijaya, Madhusudhan G. Reddy, Srinivasa Rao K. Microstructure and pitting corrosion of armor grade AA7075 aluminum alloy friction stir weld nugget zone. Effect of post weld heat treatment and addition of boron carbide. *Defence Technol.* 2015. Vol. 11. P. 166—173. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.dt.2015.01.002>.

References

1. Kablov E.N. Strategicheskie napravleniya razvitiya materialov i tekhnologii ikh pererabotki na period do 2030 goda [The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030] *Aviatsionnye materialy i tekhnologii.* 2012. No. S. P. 7—17.

12. Komkova T.Yu., Kholin M.S., Chernyshova P.I. Razrabotka kompozitsionnogo materiala sistemy Al—Al₂O₃, poluchaemogo metodom plasticheskoi deformatsii [Development of composite material systems Al—Al₂O₃ obtained by the method of plastic deformation]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2015. No. 2. P. 164—168.
13. Chien Chon Chen, Chih Yuan Chen, Hsi Wen Yang, Yang Kuo Kuo, Jin Shyong Lin. Phase equilibrium in carbothermal reduction Al₂O₃ → AlN studied by thermodynamic calculations atlas. *J. Mater. Sci.* 2014. No. 1 (2). P. 30—37. DOI: 10.5147/ajms.2014.0172.
14. Vlasova M., Kakazey N., Rosales I., Krushinskaya L., Bykov A., Tomila T., Voitshovskaya E., Vinokurov V. Synthesis of composite AlN—AlON—Al₂O₃ powders and ceramics prepared by high-pressure sintering. *Sci. Sinter*. 2010. No. 42. P. 283—295. DOI: 10.2298/SOS1003283V.
15. Afanas'ev V.K., Gertsen V.V., Dolgova S.V., Musokhranov Yu.M., Popova M.V. O vliyaniy vodyanogo para na formirovaniye svoystv vysokokremnistykh Al-splavov [About the influence of water vapor on the formation of properties of high-silicon Al alloys]. *Metallurgiya mashinostroeniya*. 2015. No. 5. P. 17—22.
16. Orlov A.V., Luts A.R., Kandalova E.G., Makarenko A.G. Tekhnologiya polucheniya kompozita Al—TiC iz poroshkovykh ekzotermicheskikh smesei neposredstvenno v rasplave alyuminiya [The technology of obtaining composite Al—TiC of exothermic powder mixtures directly in the melt of aluminium]. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii*. 2005. No. 11. P. 54—61.
17. Mohsen Hossein-Zadeh, Mansour Razavi, Omid Mirzaee, Razieh Ghaderi. Characterization of properties of Al—Al₂O₃ nano-composite synthesized via milling and subsequent casting. *J. King Saud Univ. — Eng. Sci.* 2013. No. 25. P. 75—80. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jksues.2012.03.001>.
18. Dinesh Kumar Koli, Geeta Agnihotri, Rajesh Purohit Properties and characterization of Al—Al₂O₃ composites processed by casting and powder metallurgy routes (Review). *Int. J. Latest Trends Eng. Technol. (IJLTET)*. 2013. Vol. 2. Iss. 4. P. 486—493.
19. Anisimov O.V. Tekhnologiya polucheniya kompozitsionnykh materialov na osnove alyuminiya, uprochnennykh dispersnyimi nanochastitsami ZrO₂ i SiC v pole tsentrobeznykh sil tsentrifugi [The technology of obtaining composite materials based on aluminum, reinforced with dispersed nanoparticles of ZrO₂ and SiC in the field of centrifugal forces centrifuges]: Abstract of the dissertation of PhD. Moscow: MAMI, 2012.
20. McDanels D.L., Signorelli A.R. Evaluation of low cost aluminum composites for aircraft engine structural applications. NASA Tech. Memo. No. 83357. Washington, DC, 1983
21. Chernyshov E.A., Romanova E.A., Romanov A.D. Razrabotka teplovydelyayushchego elementa na osnove vysokometallizirovannogo bezgazovogo topliva [Development of fuel cells based on vysokomehanizirovannoe gasless fuel]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie*. 2015. No. 6 (105). P. 74—81.
22. Chernyshov E.A., Myl'nikov V.V., Myl'nikova M.V., Romanov A.D., Romanova E.A. Sozdanie metallokeramicheskikh elementov ballisticheskoi zashchity s primeneniem keramiki na osnove alyuminiya [Creation of ceramic-metal elements of ballistic protection with use of ceramics on the basis of aluminum]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*. 2014. No. 4. P. 97—100.