

Современное состояние производства алюминиевых сплавов, упрочненных неметаллическими наполнителями

Рассмотрены тенденции развития промышленного производства литейных композиционных сплавов на основе алюминия (АКС), упрочненных высокомодульными неметаллическими наполнителями. Выполнен анализ динамики изменения общего объема мирового производства и потребления сплавов на основе алюминия, в том числе композиционных сплавов. Показано, что общее потребление металломатричных композиционных сплавов, упрочненных неметаллическими наполнителями, несмотря на ежегодные темпы роста 5,7-5,9%, в настоящее время составляет лишь около 0,01% от общего объема мирового производства алюминия. Сделан вывод, что для устранения существующих ограничений производственных процессов получения литейных композиционных сплавов на основе алюминия необходимо, прежде всего, обеспечить доступность армирующих наполнителей, технологичность и простоту реализации металлургических процессов синтеза литейных дисперсно-упрочненных АКС.

Ключевые слова: металломатричные композиты, сплавы на основе алюминия, синтез композиционных сплавов, неметаллические наполнители.

Современные тенденции развития промышленного производства определяются требованиями уменьшения веса, экологичности, низкой стоимости и качества продукции. Острая потребность в новых материалах с особыми свойствами и улучшенными эксплуатационными характеристиками, прежде всего в таких областях, как транспортное машиностроение, электротехническая, авиационная, космическая, атомная, оборонная промышленность, вызвала большой интерес исследователей к активной разработке технологий получения сплавов, упрочненных неметаллическими тугоплавкими, преимущественно керамическими, высокопрочными высокомодульными наполнителями.

Композиционные материалы на металлической основе, или металломатричные композиты (ММК), армированные различными неметаллическими фазами, характеризуются сочетанием высокой удельной прочности, жесткости и жаропрочности, повышенными антифрикционными свойствами и износостойкостью в широком диапазоне температур, при высоких динамических нагрузках, которыми традиционные сплавы в большинстве случаев инженерной практики обеспечить потребителя уже не могут [1]. В то же время ММК превосходят и традиционные полимерные композиционные материалы по ряду параметров: стойкость к воздействию влаги, агрессивных сред (органических растворителей, масел, топливных материалов, антифризов и т. п.), открытого пламени; высокие тепло- и электропроводность; способность выдерживать высокие температуры, нетоксичность, отсутствие газовой выделений при эксплуатации изделий. Помимо существенного повышения разнообразных эксплуатационных свойств, упрочнение сплавов керамическими фазами позволяет существенно уменьшить затраты на легирование, сократить потребление таких металлов, как титан, никель, хром, вольфрам, кобальт и др. Однако производство изделий из ММК до настоящего времени остается

относительно высокочрезмерно затратным процессом, а технологические способы получения таких сплавов, несмотря на все их большое разнообразие и видимый прогресс в разработке новых методов синтеза композиционных металломатричных сплавов, пока не привели к снятию имеющихся ограничений на массовое производство изделий из этих материалов [2-4].

Одним из перспективных направлений в создании композиционных материалов на металлической основе в течение последних десятилетий является синтез сплавов на основе алюминия с использованием дисперсных неметаллических материалов [5, 6]. Первыми и наиболее широко применяемыми неметаллическими материалами, используемыми при получении металломатричных композитов на основе алюминия и его сплавов, являются графит, алюмооксидные (Al_2O_3) и карбидные (SiC) керамические наполнители [1]. Также часто применяются карбиды титана, бора, вольфрама, оксиды и бориды циркония, титана и другие неметаллические материалы в виде дисперсных частиц, нитевидных кристаллов или волокон. Изменяя состав, форму, размер и содержание армирующих наполнителей, можно получать алюминиевые композиционные сплавы (АКС), по некоторым свойствам превосходящие сплавы системы Fe-C [1, 7].

Стоимость дисперсных армирующих материалов зависит от конъюнктуры рынка и значительно отличается для различных видов керамических порошков в зависимости от химического состава, дисперсности и степени чистоты (рис. 1). С целью снижения затрат на производство АКС также предпринимаются попытки применения дешевых и недефицитных материалов, в том числе кремнезема, сажи, алюмосиликатов, порошкообразных отходов техногенных производств [8].

То, что среди различных используемых материалов для формирования металлической основы (матрицы) при производстве ММК наиболее широко применяется алюминий и его сплавы, объясняется

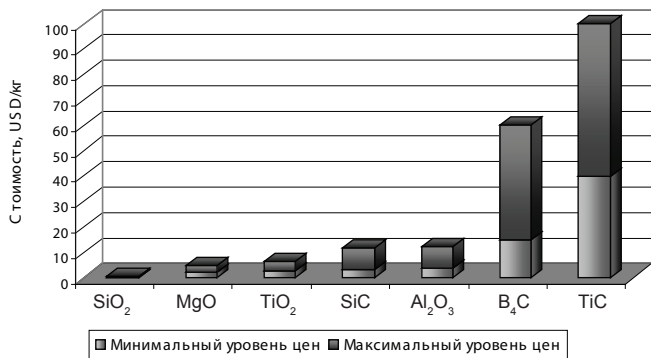


Рис. 1. Стоимость различных дисперсных керамических материалов (по данным открытых источников и интернет-ресурсов по состоянию на 2016 г.)

не только известным благоприятным сочетанием физико-механических свойств (низкий удельный вес, высокая удельная прочность, хорошая коррозионная стойкость и др.) и технологичностью обработки алюминиевых сплавов, но также и положительной динамикой снижения стоимости алюминия (рис. 2) в сочетании с достаточно устойчивым ростом его мирового производства в последние годы (рис. 3).

Увеличение объема производства и спроса на алюминий в машиностроении, автомобилестроении, судостроении и многих других областях, с одной стороны, и невысокие ежегодные показатели роста производства стали, с другой, свидетельствует о том, что конструкционные сплавы на основе алюминия продолжают заменять сталь при производстве не только различных транспортных средств (легковых и грузовых автомобилей, автобусов, поездов, велосипедов, речных и морских судов, авиационной техники), но и в электротехнической промышленности (в высоковольтных линиях электропередачи, шинах электрических подстанций, телевизионных и спутниковых антеннах), в строительстве (алюминиевые профили, системы структурного остекления, кровельные материалы), в упаковочной промышленности. Особая роль в замене стальных и чугунных изделий при производстве новых видов высокотехнологичной техники отводится композиционным сплавам на основе алюминия, упрочненным неметаллическими наполнителями [1, 7].

Тем не менее следует обратить внимание, что по имеющимся в открытом доступе данным Интернет-ресурсов (BCC Research, Grand View Research, Business Wire), общее потребление всех произведенных металломатричных композиционных сплавов, упрочненных неметаллическими наполнителями, несмотря на ежегодные темпы роста в среднем 5,7-5,9%, в настоящее время составляет только немногим более 0,01% от общего объема мирового производства алюминия, что совершенно не соответствует возможному потенциалу физико-механических и эксплуатационных свойств ММК с учетом предъявляемых требований к современной технике (рис. 4).

Данные аналитических исследований по вопросам производства и потребления ММК свидетельствуют о том, что низкий уровень объемов производства в сочетании с высокими производственными затратами

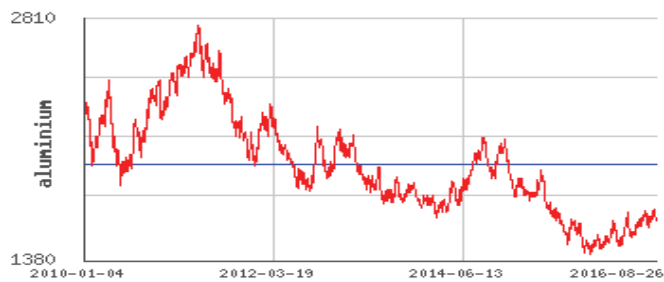


Рис. 2. Динамика цен на алюминий на Лондонской бирже металлов за 2010-2016 гг. (по данным сайта <http://metal4u.ru/lme>)

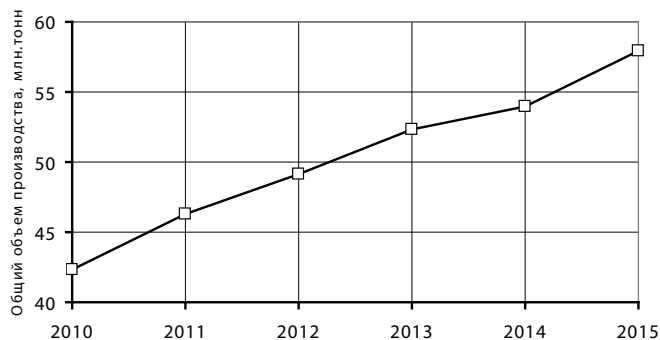


Рис. 3. Общий объем мирового производства алюминия за 2010-2015 гг. (по данным International Aluminium Institute (IAI), <http://www.world-aluminium.org>)

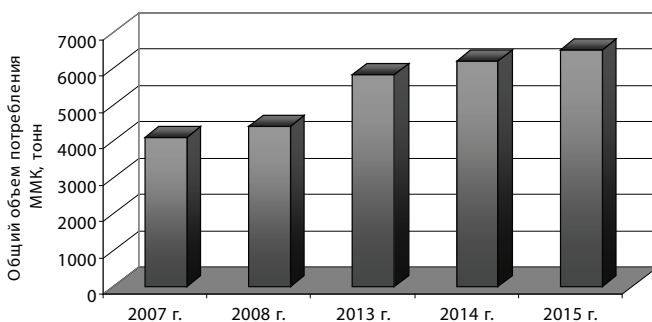


Рис. 4. Общий объем мирового потребления ММК (по данным Интернет-ресурсов BCC Research, Grand View Research, Business Wire)

этих материалов, как ожидается, будет препятствовать расширению рынка и в течение последующего пятилетнего периода до 2020 года. Прогнозируется, что мировой рынок металломатричных композитов с учетом наблюдаемого ежегодного роста до 5,9% достигнет к 2020 г. только 8,7 тысяч тонн и немногим более 10 тысяч тонн к 2022 г. При этом, по расчетам аналитиков Grand View Research, общая стоимость ММК в 2022 г. составит 433, 3 млн. долл., или около 43 долларов за 1 кг, что на порядок выше стоимости литья деталей из алюминия и его сплавов.

Металломатричные композиты на основе алюминия и его сплавов занимают самый большой сегмент рынка ММК – более 30% от общего объема. По оценкам зарубежных экспертов, с 2014 г. предпочтительнее потребителей ММК композиционным сплавам на

основе алюминия объясняется повышенным спросом на эти материалы, прежде всего, в авиационной и аэрокосмической промышленности, а также в автомобилестроении. ММК на основе тугоплавких металлов являются востребованными при производстве инструмента, элементов систем контроля ядерных реакций, панелей солнечных батарей, элементов космических аппаратов.

В настоящее время проводятся активные исследования в области создания дисперсно-упрочненных алюминиевых сплавов и экономически эффективных, ресурсосберегающих жидкофазных технологий их получения научными коллективами практически всех промышленно развитых стран, прежде всего, США, Китая, Индии, Японии, Германии.

Значительный вклад в разработку жидкофазных процессов получения литых дисперсно-упрочненных АКС вносят научные школы Украины и России, в том числе Физико-технологического института металлов и сплавов (ФТИМС) НАН Украины под руководством А. А. Щерецкого и А. С. Затуловского, Института металлургии и материаловедения (ИМЕТ) им. А. А. Байкова РАН под руководством Т. А. Чернышовой, Владимирского государственного университета под руководством И. В. Гаврилина, Самарского государственного технического университета, Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» и др. В Беларуси проводятся исследования металлургических процессов синтеза литейных алюминиевых сплавов с использованием керамических материалов и рафинирующей обработки расплавов в Белорусском национальном техническом университете под руководством Б. М. Немененка, в Физико-техническом институте НАН Беларуси совершенствуются технологии получения АКС с использованием композиционных лигатур под руководством А. Т. Волочко [9-11].

Одним из наиболее перспективных направлений в создании композиционных материалов на основе алюминия и его сплавов с использованием неметаллических материалов является разработка жидкофазных и жидко-твердофазных металлургических способов синтеза и технологий литья (реолитье, тиксоитье, комполитье) дисперсно-упрочненных АКС [9, 10]. Однако фундаментальные проблемы физико-химических процессов на границе раздела фаз в системах «алюминий/керамическая фаза» при температурах выше температуры плавления металлической основы, связанные с вопросами смачивания жидким металлом поверхности дисперсных неметаллических частиц, сдерживают разработку эффективных технологических процессов получения таких сплавов.

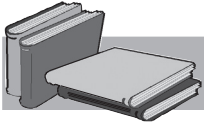
Таким образом, в настоящее время, несмотря на то, что накоплен большой объем теоретических и экспериментальных данных по свойствам и характеристикам АКС, тем не менее, сфера производства и рынок композиционных сплавов на основе алюминия пока находятся на начальной стадии развития [3].

Основными компаниями, активно занимающимися освоением рынка ММК, по данным Интернет-ресурсов Grand View Research, являются зарубежные предприятия: Sandvik AB, Materion Corporation, GKN PLC, Plansee SE, 3M, Sumitomo Electric Industries, Ltd., CPS Technologies Corporation, Hitachi Metals, Ltd., Deutsche Edelstahlwerke GmbH, and 3A Composites International AG. Небольшой сегмент рынка ММК занимают также компании Ceradyne, Inc., ADMA Products, Inc., Ametek Specialty Metal Products, Daewha Alloytic Co. Ltd., DWA Aluminum Composites, Metal Matrix Cast Composites LLC, MI-Tech Metals, Inc., Thermal Transfer Composites LLC, and TISICS Ltd. Отечественные, также как и российские предприятия, в списке компаний, формирующих спрос на ММК, не представлены. При этом доминирующие позиции в производстве и потреблении ММК принадлежат компаниям Северной Америки (более 34,8% в 2013 г. от общего объема спроса).

В целом, высокий рост спроса на ММК демонстрируют компании таких стран, как Китай, Бразилия, Индия, США, Израиль и Германия, преимущественно, в связи с инновационными запросами автомобильной, электронной, обрабатывающей и оборонной промышленности.

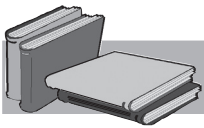
Выводы

Несмотря на очевидный научный и практический интерес к композиционным сплавам на основе алюминия, существующие разнообразные технологические процессы получения АКС до настоящего времени не позволили реализовать их низкочастотное производство в необходимых промышленности объемах. Анализ современного состояния производства алюминиевых сплавов, упрочненных неметаллическими наполнителями, показывает, что для устранения существующих ограничений производственных процессов получения таких сплавов необходимо, прежде всего, обеспечить доступность армирующих наполнителей, технологичность и простоту реализации металлургических процессов синтеза литейных дисперсно-упрочненных АКС.



ЛИТЕРАТУРА

1. Rohatgi P. K. Metal-matrix Composites // Defence Science Journal. – 1993. – Vol. 43, № 4. – PP. 323-349.
2. Yoshinori Nishida. Introduction to Metal Matrix Composites: Fabrication and Recycling / Springer Science & Business Media, 2013. – 203 p.
3. Панфилов А. А., Прусов Е. С., Кечин В. А. Проблемы и перспективы развития производства и применения алюмоматричных композиционных сплавов // В сб. трудов Нижегородского гос. техн. университета им. П. Е. Алексеева. – 2013. – № 2 (99). – с. 210-217.
4. Bala G. Narasimha, Vamsi M. Krishna, Dr. Anthony M. Xavier. A Review on Processing of Particulate Metal Matrix Composites and its Properties // International Journal of Applied Engineering Research. – 2013. – Vol. 8, № 6. – PP. 647-666.
5. Satyanarayana K. G., Pillai R. M., Chandrasekhar Ballembettu Pai. Recent developments and prospects in cast aluminium matrix composites // Transactions-Indian Institute of Metals. – 2002. – Vol. 55, № 3. – pp. 115-130.
6. Курганова Ю. А., Чернышова Т. А., Курганов С. В., Толмачев К. С. Реализация потенциальных возможностей дисперсно-упрочненного алюмоматричного композиционного материала в реальных условиях антифрикционного контакта // Технология металлов. – 2013. – № 6. – С. 41-47.
7. Surappa M. K. Aluminium matrix composites: Challenges and opportunities // Sadhana. – 2003. – Vol. 28, Parts 1 & 2. – pp. 319-334.
8. Raja Selvam J. D., D.S. Robinson Smart, Dinaharan I. Microstructure and some mechanical properties of fly ash particulate reinforced AA6061 aluminum alloy composites prepared by compocasting // Materials and Design. – 2013. – Vol. 49. – pp. 28-34.
9. Рафальский И. В., Арабей А. В., Немеенок Б. М. Физико-химические основы синтеза силуминов с использованием кварцосодержащих материалов. – Минск: БНТУ, 2015. – 140 с.
10. Рафальский И. В. Ресурсосберегающий синтез сплавов на основе алюминия с использованием дисперсных неметаллических материалов и интеллектуальные методы контроля металлургических процессов их получения. – Минск: БНТУ, 2016. – 308 с.
11. Волочко А. Т. Переработка и использование алюминиевых отходов в производстве порошков, паст, композиционных и керамических материалов. – Минск: Бел. наука, 2006. – 302 с



REFERENCES

1. Rohatgi P. K. (1993). Metal-matrix Composites. Defence Science Journal, vol. 43, no. 4, pp. 323-349 [in English].
2. Yoshinori Nishida (2013). Introduction to Metal Matrix Composites: Fabrication and Recycling. Springer Science & Business Media, 203 p. [in English].
3. Panfilov A. A., Prusov E. S., Kechin V. A. (2013). Problemy i perspektivy razvitiia proizvodstva i primeneniia alyumomatrichnykh kompozitsionnykh splavov [Problems and prospects of development of production and application of alumo-matrix composite alloys]. Trudy Nizhegorodskogo gos. techn. universiteta im. R. E. Alekseeva, no. 2 (99), pp. 210-217 [in Russian].
4. Bala G. Narasimha, Vamsi M. Krishna, Dr. Anthony M. Xavier (2013). A Review on Processing of Particulate Metal Matrix Composites and its Properties. International Journal of Applied Engineering Research, vol. 8, no. 6, pp. 647-666 [in English].
5. Satyanarayana K. G., Pillai R. M., Chandrasekhar Ballembettu Pai. (2002). Recent developments and prospects in cast aluminium matrix composites. Transactions-Indian Institute of Metals, vol. 55, no. 3, pp.115-130 [in English].
6. Kurganova Yu. A., Chernyshova T. A., Kurganov S. V., Tolmachev K. S. (2013). Realizaciya potencial'nykh vozmozhnostei dispersno-uprochnennogo alyumomatrchnogo kompozitsionnogo materiala v real'nykh usloviakh antifriktsionnogo kontakta [Realization of potential possibilities of dispersed-hardened alumo-matrix composite material under real conditions of antifriction contact]. Technology of metals, no. 6, pp. 41-47 [in English].
7. Surappa M. K. (2003). Aluminium matrix composites: Challenges and opportunities. Sadhana, vol. 28, parts 1, 2, pp 319-334 [in English].
8. Raja Selvam J. D., D.S. Robinson Smart, Dinaharan I. (2013). Microstructure and some mechanical properties of fly ash particulate reinforced AA6061 aluminum alloy composites prepared by compocasting, vol. 49, pp. 28-34 [in English].
9. Rafalskiy I. V., Arabei A. V., Nemenenok B. M. (2015). Fiziko-khimicheskie osnovy sinteza siluminov s ispol'zovaniem kvartsoderzhashchikh materialov [Physicochemical basis of Al-Si alloys synthesis using quartz-containing materials]. Minsk: BNTU, 140 p. [in Russian].
10. Rafalskiy I. V. (2016). Resursosberegaiushchii sintez splavov na osnove aliuminiia s ispol'zovaniem dispersnykh nemetallicheskiikh materialov i intellektual'nye metody kontrolya metallurgicheskikh processov ikh polucheniia [Resource-saving synthesis of aluminum alloys using dispersed nonmetallic materials and intelligent methods of controlling metallurgical processes for their production]. Minsk BNTU, 308 p. [in Russian].
11. Volochko A. T. (2006). Pererabotka i ispol'zovanie alyuminiyevykh otkhodov v proizvodstve poroshkov, past, kompozitsionnykh i keramicheskikh materialov [Processing and use of aluminum waste in the production of powders, pastes, composite and ceramic materials]. Minsk: Bel. Nauka, 302 p. [in Russian].

Анотація

Немененок Б. М., Рафальский І. В.

Сучасний стан виробництва алюмінієвих сплавів, зміцнених неметалевими наповнювачами

Розглянуто тенденції розвитку промислового виробництва ливарних композиційних сплавів на основі алюмінію (АКС), зміцнених високомодульними неметалевими наповнювачами. Виконано аналіз динаміки загального обсягу світового виробництва і споживання сплавів на основі алюмінію, в тому числі композиційних сплавів. Показано, що загальне споживання металоматричних композиційних сплавів, зміцнених неметалевими наповнювачами, незважаючи на щорічні темпи зростання 5,7-5,9%, в даний час складає лише близько 0,01% від загального обсягу світового виробництва алюмінію. Зроблено висновок, що для усунення існуючих обмежень виробничих процесів отримання ливарних композиційних сплавів на основі алюмінію необхідно, перш за все, забезпечити доступність армуючих наповнювачів, технологічність і простоту реалізації металургійних процесів синтезу ливарних дисперсно-зміцнених АКС.

Ключові слова

Металоматричні композити, сплави на основі алюмінію, синтез композиційних сплавів, неметалеві наповнювачі.

Summary

Nemenenok B., Rafalskiy I.

The present state of production of aluminum alloys reinforced by non-metallic fillers

The trends of development of industrial production of the casting aluminum matrix composites (AMC) reinforced by high-modulus non-metallic fillers were discussed. The analysis of the dynamics of total world production and consumption of aluminum-based alloys including AMC was performed. It is shown that the total consumption of metal matrix composites, in spite of the annual growth rate of 5,7-5,9%, now accounts for only about 0.01% of the total global production of aluminum. It is concluded that the elimination of the existing restrictions of production processes of casting AMC consists primarily in ensuring the availability of reinforced fillers, as well as manufacturability and ease of implementation of the metallurgical processes of synthesis of casting particulate reinforced AMC.

Keywords

Metal matrix composites, aluminum-based alloys, synthesis of composite alloys, non-metallic fillers.

Поступила 13.03.17