DOI: 10.25515/PMI.2017.6.717

УДК 669.018.9

ВЛИЯНИЕ ДИСКРЕТНОЙ ДОБАВКИ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА

Ю.А.КУРГАНОВА, С.П.ЩЕРБАКОВ
Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана (*национальный исследовательский университет*), *Москва*, *Россия*

На основе литературного обзора выявлена проблема и обозначена актуальность разработки технологии введения добавок наноразмерных наполнителей в алюминиевые сплавы с целью определения механизма управления структурно зависимыми свойствами. В качестве такой добавки выбраны измельченные волокна оксида алюминия диаметром 10-20 нм. Введение добавки в расплав реализовано с помощью механического замешивания. Технологические особенности процесса позволили решить проблему преодоления сил поверхностного натяжения и распределения количественно малых и легких по сравнению с основным материалом добавок. Экспериментальные образцы получены в лабораторных условиях с использованием разработанных специальных приспособлений. Для выполнения сравнительного анализа были получены образцы базового сплава состава АК6 и наполненного дискретной добавкой 1 % сплава того же состава по идентичным режимам. Исследования структуры и свойств базового сплава и образцов, полученных путем замешивания в базовый сплав тонких дискретных волокон оксида алюминия в объеме 1 % проведены по стандартным методикам металлографического анализа и методом измерения твердости. В результате макро- и микроскопических исследований выявлен модифицирующий эффект от добавления тонкодисперсного Al_2O_3 в алюминиевый сплав, выраженный в измельчении зерна. Полученная в результате обработки статистических данных форма кривых распределения твердости идентична для сравниваемых образцов и имеет выраженный смещенный экстремум, что свидетельствует о внесенных изменениях в свойства с одной стороны, и демонстрирует достаточный уровень усвоения расплавом добавки – с другой. Следовательно, целесообразность использования рассматриваемого метода модифицирования при получении материалов данной группы очевидна.

***Ключевые слова*:** модифицирование, металломатричные материалы, оценка структуры и свойств, оксид алюминия

Как цитировать эту статью: Курганова Ю.А. Влияние дискретной добавки оксида алюминия на структуру и свойства алюминиевого сплава / Ю.А.Курганова, С.П.Щербаков // Записки Горного института. 2017. Т. 228. С. 717-721. DOI: 10.25515/PMI.2017.6.717

Введение. Алюминий является важным компонентом многих сплавов. Алюминий и сплавы в силу своих уникальных свойств весьма востребованны [1-3, 5, 7]. Разработчиками изделий формулируются конкретные требования к материалам конструкций нового поколения по обеспечению высокого уровня однородности структуры отливок, что связано с постоянно растущими требованиями к повышению рабочих характеристик, а также надежности материалов. В таких условиях модифицирование сплавов является актуальным и перспективным технологическим приемом. Известно, что модифицирование алюминиевых сплавов повышает технологическую пластичность и равномерность распределения механических свойств в объеме заготовки [2, 6]. Важным достоинством является сохранение низкой плотности. Однако существует реальная технологическая проблема введения модифицирующих добавок для преодоления сил поверхностного натяжения и распределения количественно малых и достаточно легких по сравнению с основным материалом добавок.

Совместная работа разнородных компонентов дает определенный эффект и позволяет направленно регулировать изменение структуры и свойств. Эффективность использования различных модификаторов зависит от формы, количества и технологии введения. Наиболее перспективными материалами для модифицирования литейных алюминиевых сплавов в настоящее время являются дискретные волокна с диаметром нанодиапазона, в основном нитевидные кристаллы [6, 9, 12, 13, 15, 16]. Эффект модифицирования обеспечивается введением в расплав небольшого количества (0,05-0,15 % от массы расплава) добавок при литье. В силу разности механических свойств компонентов композиции существует явная проблема введения таких добавок.

Методика исследования. За базовый принят сплав на основе алюминия АК6. В качестве модифицирующей добавки выбрано дискретное волокно оксида алюминия, согласно данным производителя представленный бренд «Nafen» является чистым Al_2O_3 диаметром 10-20 нм с термостабильностью до 1200 °С.

Известны различные способы совмещения алюминиевых матриц с наполнителями для получения композиционного материала (КМ): твердофазное или жидкотвердофазное компактирование порошковых смесей, в том числе подготовленных механическим легированием, литейные технологии пропитки пористых каркасов из волокон, порошков или коротких волокон или механического заме-

DOI: 10.25515/PMI.2017.6.717

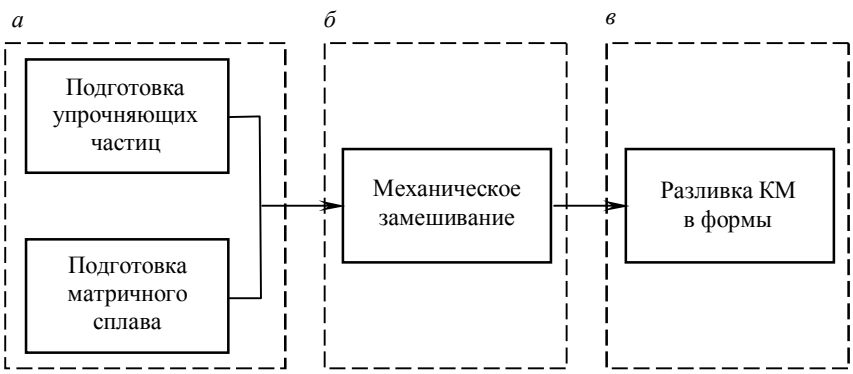


Рис.1. Схема получения экспериментального образца:
а – подготовка исходных компонентов; *б* – создание связи;
в – придание формы

шивания дискретных наполнителей в расплавы, газотермическое напыление композиционных смесей. Изготовление жидкофазными способами возможно при смачивании наполнителей расплавами или применения внешнего принудительного давления. Из перечисленных способов производства КМ наиболее технологичным и дешевым является литейный способ механического замешивания. Процесс получения образцов для исследования представлен на рис.1.

Качество получаемых при этом образцов (распределение наполнителя, уровень межфазной связи, наличие продуктов взаимодействия и пр.) зависит от смачивающей способности матричного расплава, условий замешивания или последующей обработки. Технологически значимыми параметрами литейного процесса являются конструкция установки для замешивания; режимы замешивания и затвердевания; температуры расплава и предварительного нагрева частиц, скорость вращения приспособления, обеспечивающего введение и распределение наполнителя, длительность замешивания и выдержки композиционной смеси перед разливкой, скорость кристаллизации.

Условия получения объекта исследования носили единичный характер, а технология изготовления разработана для лаборатории, поэтому размер одной партии составлял порядка 300 г. Матричный сплав доводили до плавления и перегревали до температуры 800 °С, оксид алюминия, завернутый в алюминиевую фольгу, погружали под зеркало расплава, обеспечивая интенсивное перемешивание. Разработка и изготовление приспособлений для введения добавки осуществлена сотрудниками лаборатории «Композиционные и неметаллические материалы» кафедры «Материаловедение» МГТУ им. Н.Э.Баумана.

Выбор температуры расплава обоснован технологическими особенностями: чем выше температура расплава, тем лучше смачиваемость, что в свою очередь должно обеспечить полноценное усвоение добавки. С другой стороны, весомым препятствием для повышения температуры расплава служит рост оксидной пленки на поверхности расплава. При плавке на воздухе алюминий интенсивно окисляется. В результате окисления алюминия образуются оксиды алюминия Al_2O_3, а также Al_2O и AlO. Вероятность образования оксидов возрастает с увеличением температуры. В обычных условиях плавки термодинамически устойчивой фазой является твердый оксид алюминия γ-Al_2O_3, не растворимый в алюминии и не образующий с ним легкоплавких соединений. При нагреве до 1200 °С γ-Al_2O_3, перекристаллизовывается в α-Al_2O_3. По мере окисления на поверхности твердого и жидкого алюминия образуется плотная, прочная пленка оксида толщиной до 10 мкм в зависимости от температуры и длительности выдержки. При достижении такой толщины окисление практически приостанавливается, так как диффузия кислорода через пленку резко замедляется. Процесс окисления жидких сплавов алюминия неоднозначный и малоизученный. Тем не менее теоретические выкладки и анализ результатов практических наработок позволили осуществить рациональный выбор температуры расплава.

Следующим важным технологическим параметром является продолжительность перемешивания и выдержки (выстаивания). При недостаточной выдержке можно не получить достаточную однородность распределения добавок в матричном расплаве. Выбор режима осуществляли эмпирическим путем.

С целью получения отливок с равномерным распределением свойств по сечению для исключения влияния температурного градиента на условия кристаллизации заливку смеси проводили в графитовой форме. Графитовая изложница удобна тем, что заливку металла можно производить без предварительной подготовки формы и готовая отливка не прилипает к форме даже без использования специальных покрытий.

DOI: *10.25515/PMI.2017.6.717*

Химический состав экспериментальных базового и образца с введенной добавкой 1 % Al_2O_3 (модифицированного), установленный методом лазерного атомно-эмиссионного спектрального анализа, следующий:

Образец	Cu	Si	Cr	Ni	Fe	Mg	Mn	Ti	Zn	Al
Исходный	2,27	1,00	< 0,001	0,02	0,40	0,59	0,51	0,05	0,06	Основа
Модифицированный	2,28	1,01	< 0,001	0,02	0,40	0,58	0,52	0,05	0,06	Основа

Сравнительный анализ структуры. Исследование макроструктуры на микроскопе Neophot 21 с приставкой для макроскопических исследований продемонстрировало наличие явного измельчения, что подтвердило прогнозируемый модифицирующий эффект (рис.2).

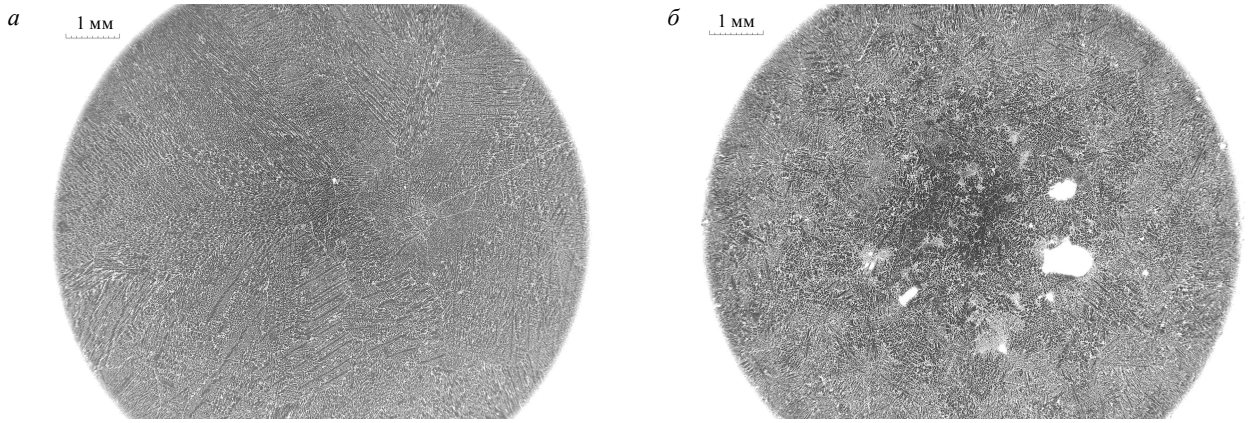


Рис.2. Макроструктура литого алюминиевого сплава без добавки (*а*) и с добавкой в виде дисперсных волокон (*б*). Увеличение 20^x

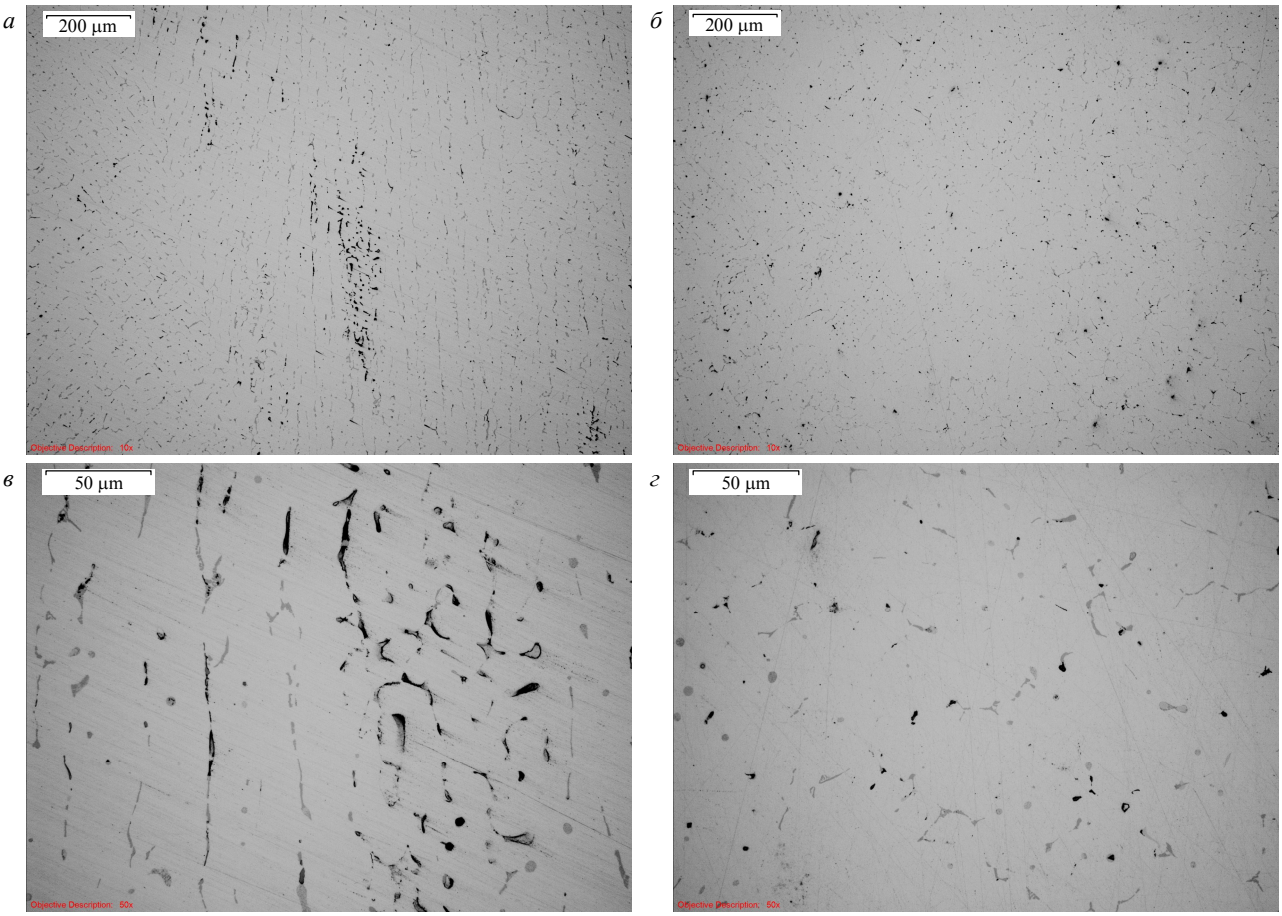


Рис.3. Микроструктура исследуемого алюминиевого сплава без добавки волокон (*а*, *в*) и с волокнами (*б*, *г*) до травления при увеличении 100^x и 500^xсоответственно

DOI: 10.25515/PMI.2017.6.717

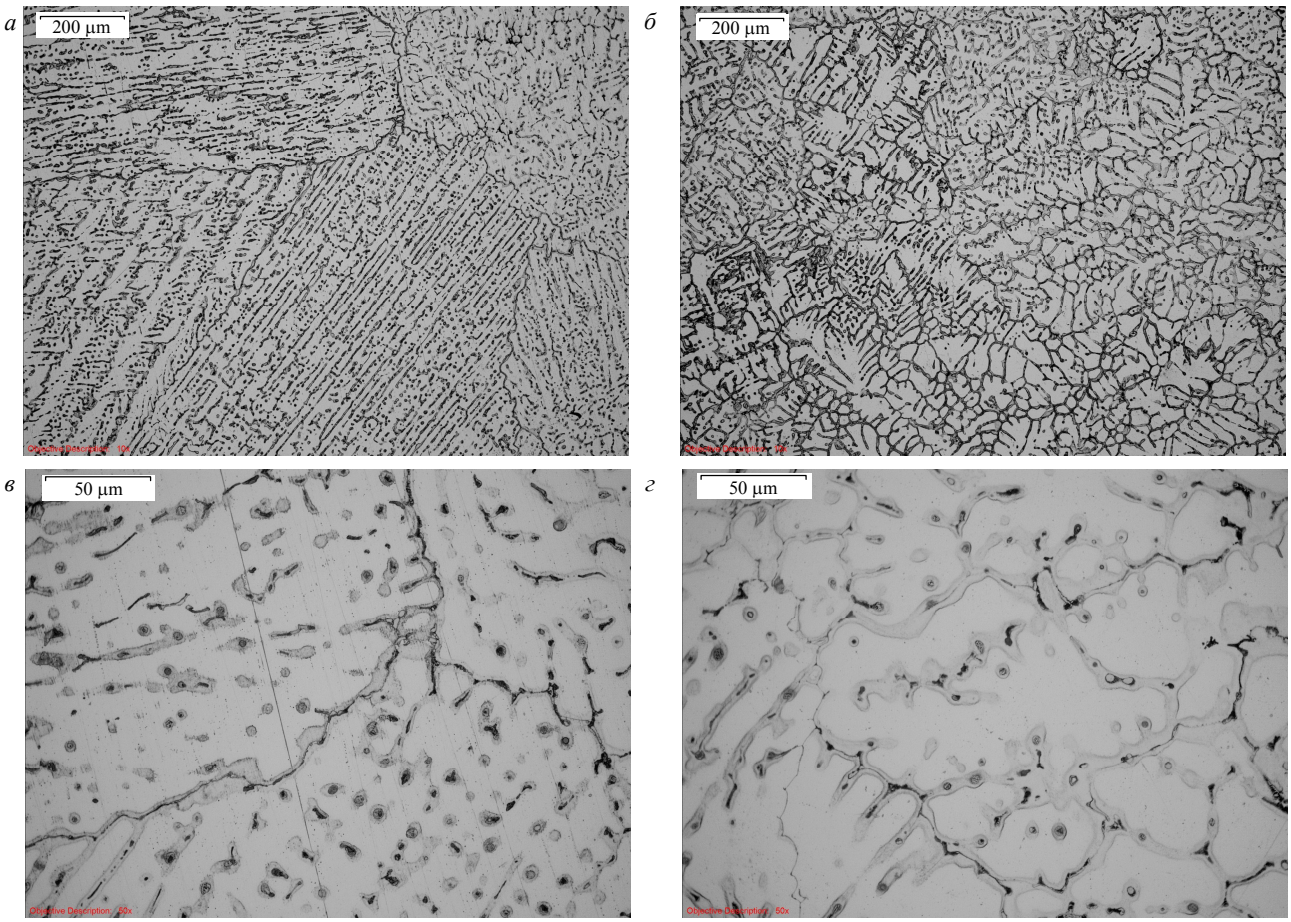


Рис.4. Микроструктура литого алюминиевого сплава без добавки волокон (*а*, *в*) и с волокнами (*б*, *г*) после травления при увеличении 100^x и 500^x соответственно

Видно, что размер структурных составляющих в образце с добавками меньше, чем в базовом. В модифицированном образце присутствуют большие поры, по-видимому, это пузырьки воздуха, которые не успели всплыть на поверхность, что свидетельствует о необходимости корректировки времени перемешивания.

Микроструктурный анализ осуществляли на микроскопе Olympus GX51 при увеличении 100^x и 500^x. Сравнительный анализ микроструктуры до (рис.3) и после травления (рис.4) в 0,5 %-ном водном растворе HF при различных увеличениях подтвердил выводы, сделанные на основе качественного макроскопического анализа об измельчении структурных составляющих. Так, за количественный показатель принят средний размер зерна. Средняя площадь зерна, оцененная по методике ГОСТ 5639-82, равна 1,1 и 0,015 мм^2 соответственно для исходного и модифицированного образцов.

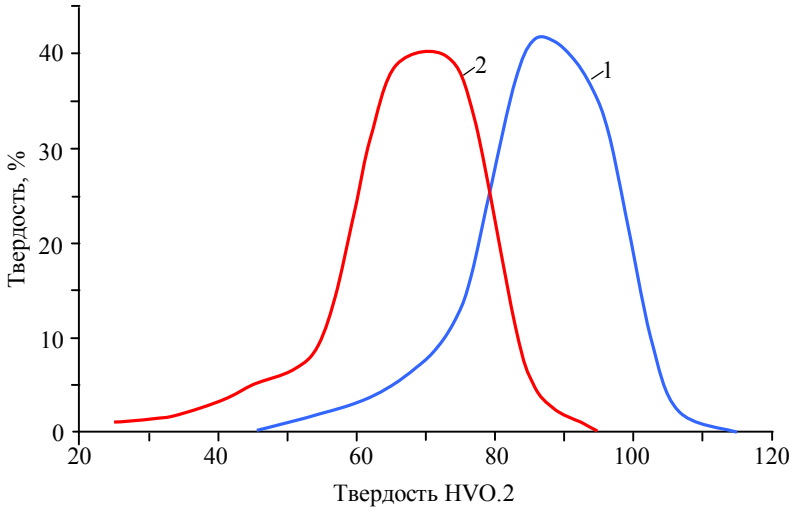


Рис.5. Кривые распределения вероятности микротвердости исходного (1) и модифицированного (2) экспериментальных образцов

Измерение твердости. По результатам измерений твердости на автоматическом микротвердомере DURASCAN 70 с нагрузкой 200 г были построены распределения вероятности микротвердости исходного и модифицированного сплавов (рис.5).

Точность повторения характера распределения вероятности микротвердости в 100 точках на площади 1 см^2 продемонстрирована доста-

DOI: *10.25515/PMI.2017.6.717*

точной структурной однородностью экспериментальных образцов. Асимметрия кривой представляет собой разницу между средним значением и модой (наиболее часто встречающимся значением), деленную на среднеквадратичное значение. Форма кривых распределения твердости имеет идентичную левостороннюю асимметрию, следовательно, можно предположить, что объем пор, внесенных условиями плавки, примерно одинаков. По результатам обсчета и как видно из графиков, средние значения твердости для исходного образца – 87 %, для модифицированного – 70 %. Следовательно, изменение твердости составляет 20 %. Смещение экстремума демонстрирует наличие эффекта от введения добавки.

Заключение. В результате проведенных исследований получены образцы алюминиевого сплава с добавкой тонкодискретного оксида алюминия диаметром 10-20 нм с помощью модернизации процесса механического замешивания. В ходе сравнительных исследований полученных экспериментальных образцов установлено влияние 1 % добавки на структуру и свойства:

• измельчение структуры со средней площади зерна 1,1 мм^2 для базового сплава и до 0,015 мм^2 для модифицированного;

• изменение твердости на 20 %.

Таким образом, анализ результатов исследования показал наличие модифицирующего эффекта в алюминиевом сплаве от введения тонкодисперсной добавки оксида алюминия с торговой маркой «Nafen». Добавку целесообразно использовать для измельчения структуры и повышения структурной однородности.

Благодарность. *Авторы выражают благодарность сотруднику фирмы «ANF Technology» М.В.Лобанову за предоставление образцов волокон.*

ЛИТЕРАТУРА

1. Исследование механических свойств МКМ на основе алюминиевого сплава, армированного дисперсными частицами карбида кремния / Ю.А.Курганова, В.В.Березовский, Ю.О.Соляев, С.А.Лурье, А.А.Шавнев // Деформация и разрушение материалов. 2014. № 12. С. 12-16.

2. *Калашников И.Е.* Развитие методов армирования и модифицирования структуры алюмоматричных композиционных материалов: Автореф. дис… д-ра техн. наук / ИМЕТ им. А.А.Байкова РАН. М., 2011. 40 с.

3. *Курганова Ю.А.* Конструкционные металломатричные композиционные материалы / Ю.А.Курганова, А.Г.Колмаков. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2015. 141 с.

4. *Курганова Ю.А.* Анализ распределения армирующей фазы в алюмоматричных КМ / Ю.А.Курганова, Ю.А.Лопатина // Заготовительные производства в машиностроении. 2015. № 4. С. 42-48.

5. Литые дисперсионно-упрочненные алюмоматричные композиционные материалы: изготовление, свойства, применение / Т.А.Чернышова, Ю.А.Курганова, Л.И.Кобелева, Л.К.Болотова / УлГТУ. Ульяновск, 2012. 295 с.

6. Модифицирование структуры наплавленного металла нанодисперсными карбидами вольфрама / Г.Н.Соколов, А.С.Трошков, В.И.Лысак и др. // Физика и химия обработки материалов. 2009. № 6. С. 41-47.

7. Смачиваемость и межфазное взаимодействие в металлическом композиционном материале на алюминиевой матрице, армированной оксидом алюминия / В.М.Серпова, А.А.Шавнев, О.И.Гришина, Е.Н.Краснов, Ю.О.Соляев // Материаловедение. 2014. № 12. С. 29-35.

8. *Фетисов Г.П.* Композиционные материалы в авиации и их прогнозирование / Г.П.Фетисов, Ю.А.Курганова, Г.Н.Гаврилов // Технология металлов. 2015. № 1. С. 22-25.

9. Enhancement of tensile and thermal properties of epoxy nanocomposites through chemical hybridization of carbon, nanotubes and alumina / M.R.Zakaria, H.M.Akil, A.A.Kudus, S.M.Saleh // Compos. A Appl. Sci. Manuf. 2014. № 66. P. 109-116.

10. Mechanical Properties of a Metallic Composite Material Based on an Aluminum Alloy Reinforced by Dispersed Silicon Carbide Particles / V.V.Berezovskiia, Yu.O.Solyaevb, S.A.Lur'eb, A.V.Babaitsevc, A.A.Shavneva, Yu.A.Kurganova // Russian Metallurgy (Metally). 2015. № 10. P.790-794.

11. Microstructure and mechanical properties of 6061Al alloy based composites with SiC nanoparticles / A.J.Knowles, X.Jiang, M.Galano, F.Audebert // J. Alloys Compd. 2014. № 615. P. 401-405.

12. Nanosilicon carbide reinforced aluminium produced by high-energy milling and hot consolidation. Mater / L.Kollo, B.C.Radbury, R.Veinthal, C.Jäggi, Carreño-Morelli, M.Leparoux // Sci. Eng. 2011. A 528 (21). P. 6606-6615.

13. Strengthening mechanisms of graphene- and Al_2O_3 – reinforced aluminum nanocomposites synthesized by room temperature milling / T.K.Meysam, J.B. Fergusona, F.S.Benjamin, C.S.Kima, K.Cho, P.K.Rohatgi // Mater. Des. 2016. № 92. P. 79-87.

14. *Saha R.* Hybrid and conventional particle reinforced metal matrix composites by squeeze infiltration casting / R.Saha, E.Morris, N.Chawla // J. Mater. Sci. Lett. 2002. № 21. P. 337-339.

15. Toughening of aluminum matrix nanocomposites via spatial arrays of boron carbide spherical nanoparticles / L.Jiang, H.Yang, J.K.Yee, X.Mo, T.Topping, E.J.Lavernia // Acta Mater. 2016. № 103. P. 128-140.

16. *Tjong S.C.* Recent progress in the development and properties of novel metal matrix nanocomposites reinforced with carbon nanotubes and graphene nanosheets // Mater. Sci. Eng. 2013. R74. P. 281-350.

Авторы: **Ю.А.Курганова**, *д-р техн. наук, профессор, kurganova_ya@mail.ru* (*Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана* (*национальный исследовательский университет*), *Москва*, *Россия*), **С.П.Щербаков**, *ассистент, slavik2002@yandex.ru* (*Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана* (*национальный исследовательский университет*), *Москва*, *Россия*).

Статья принята к публикации 27.09.2017.