

УДК 621.74:669.018.9

Жидкофазные технологии получения заготовок из алюмоматричных нанокompозитов (обзор)

Г.А. Косников*

*Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет,
Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29*

Received 12.10.2013, received in revised form 24.03.2014, accepted 15.04.2014

Рассмотрены процессы получения заготовок из алюмоматричных нанокompозитов с использованием жидкофазных технологий. Предлагается совместное использование магнитогидродинамического перемешивания, ультразвуковой обработки суспензии в жидком и жидкотвердом состояниях и преимуществ тиксоформовки.

Ключевые слова: алюмоматричные нанокompозиты, жидкофазные технологии, магнитогидродинамическое перемешивание, ультразвуковая обработка, полунепрерывное литье, тиксоформовка, заготовки.

Исследованию и разработке металломатричных композиционных сплавов (МКС) уделяется значительное внимание практически по всех экономически развитых странах благодаря комплексу механических и эксплуатационных свойств, которые могут быть получены в этом классе конструкционных материалов и которые недостижимы в материалах, получаемых с использованием традиционных технологий.

В МКС основой являются литейные или деформируемые сплавы, а армирующими элементами – дисперсные частицы, искусственно вводимые (ex-situ-процессы) или инициируемые в результате протекающих реакций (in-situ-процессы, «реакционное литье»). При этом, как правило, в качестве упрочнителей микрометрических размеров используются тугоплавкие высокопрочные частицы оксидов, карбидов, боридов, нитридов (наиболее часто SiC, Al₂O₃, B₄C, TiC). Химические реакции in-situ, протекающие в расплаве при введении химически активных металлов, газов или химических соединений, формируют термодинамически устойчивые, смачиваемые расплавом за счет возникновения когерентных границ, термостабильные при повышенных температурах эксплуатации армирующие фазы. Разновидностью in-situ-процессов выступают процессы получения композитов, при которых для синтеза армирующих частиц в расплаве алюминия используется СВС [1].

Главными критериями при выборе состава матричного сплава, размера, количества, природы армирующих частиц и способа их имплантации в расплав, метода формообразования и условий формирования свойств заготовки являются требования к свойствам готовых изделий,

стабильность структуры и свойств в процессе их эксплуатации. Это предполагает многовариантность технологических решений при получении изделий из МКС. При этом в ряде случаев требуются новые конструкторские решения в отношении изделий, в которых традиционные материалы заменяются композитами.

Используют три основные технологические схемы производства МКС:

- введение частиц в расплав при интенсивном перемешивании с помощью импеллера или магнитогидродинамического (МГД) перемешивателя;
- пропитка дисперсных частиц или преформ матричным расплавом;
- порошковая технология.

За исключением вариантов, в которых порошковая технология реализуется путем компактирования исходных порошков матричного сплава и армирующих компонентов в твердом состоянии, все три технологические схемы связаны с использованием расплавов, т.е. жидкофазных технологий, для получения МКС.

Несмотря на обилие работ, посвященных исследованию и созданию МКС, их применение до сих пор фактически не вышло из стадии полупромышленного производства. Одной из причин такого положения считается ограниченность возможностей использования МКС для получения фасонных изделий различной массы и габаритов со сложными внутренними полостями. Благодаря своей универсальности наиболее приемлемыми с этой точки зрения являются как традиционные литейные технологии, предусматривающие заполнение литейных форм сплавами, находящимися в жидком состоянии, так и тиксотехнологии, предусматривающие заполнение форм сплавами, находящимися в двухфазном состоянии.

Особенностью литейных МКС признана необходимость обеспечения равномерности распределения дисперсных частиц в объеме расплава на всех этапах получения отливок традиционными методами литья, при этом проблема седиментационной устойчивости литейных композитов непосредственно связана не только с формированием структуры и свойств МКС, но и с реализуемыми методами изготовления отливок.

Алюминиевые сплавы в настоящее время являются наиболее востребованным и распространенным среди цветных сплавов конструкционным материалом, обладающим высокой удельной прочностью и универсальным комплексом механических, эксплуатационных и специальных свойств, что обуславливает исключительное значение материалов на алюминиевой основе для развития двигателестроения, авиационной и космической техники.

Микроразмерные частицы в алюмоматричных композитах (АМК) однозначно играют роль армирующих элементов, характер взаимодействий на границе «частица-расплав» определяется, главным образом, их смачиваемостью расплавом. Эти сплавы обеспечивают высокий уровень механических и эксплуатационных свойств и могут быть использованы для получения заготовок методом литья.

Особый интерес представляют работы, направленные на получение металломатричных нанокompозитов за счет комплексного использования *ex-situ*- и *in-situ*-процессов (полиармирование). Положительное влияние наноразмерных дисперсных частиц в композитах, получаемых, главным образом, методами порошковой металлургии, доказало перспективность наноструктурных АМК (НАМК). Все положительные качества микроразмерных композитов в нанокompозитах реализуются в значительно большей степени. Однако высокие энергетиче-

ский потенциал, удельная поверхность и межфазная энергия частиц, поверхностное натяжение расплава, усиление диффузионных процессов, протекающих тем интенсивнее, чем выше технологические температуры и ниже вязкость расплава, требуют принятия специфических технологических решений, отличных от технологий получения микроразмерных композиций

Примером, иллюстрирующим заинтересованность в разработке нанокompозитов, служит принятая в США программа по созданию дискретно-армированных нанокompозитов на основе алюминиевых сплавов системы Al-Mg-Sc-Zr с целью расширения температурных пределов эксплуатации материалов для ракетных двигателей, ГТД и авиационных конструкций [2].

Внимание, уделяемое этой проблеме в нашей стране, иллюстрируется государственными программами (соответствующая подпрограмма на 2011–2015 гг. ФЦП “Национальная технологическая база”, направленная на создание композитов на базе силуминов и внедрение тиксотехнологий в дизелестроении; ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы»; конкурс Минпромторга, предусматривающий разработку сплавов и оборудования для тиксолитья; мероприятия, осуществляемые в соответствии с постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218 и др.), а также тематикой и количеством защищенных диссертаций, грантов различного уровня.

В РФ вопросами получения НАМК, преимущественно триботехнического назначения, занимаются в различных организациях, наиболее интенсивно – в ИММ им. А.А. Байкова РАН, ВлГТУ, Сибирском ГАУ им. акад. М.Ф. Решетнева, МИСиС, СПбГПУ.

Большинство исследователей наночастицам в алюминиевых сплавах отводят роль модификаторов. Микрочастицы SiC располагаются преимущественно на границах эвтектических зерен, а наночастицы SiC – в дендритах первичного твердого раствора. Тенденция микрочастиц располагаться по границам зерен приводит к снижению вязкости разрушения, прочности и твердости при повышенных температурах и ухудшению обрабатываемости [3]. Наночастицы SiC и Al_2O_3 влияют на размер и морфологию образующихся в расплаве интерметаллидных соединений, а в результате взаимодействия наноразмерных частиц SiC с Ti образуется упрочняющая фаза TiC [4]. Высказывается мнение, что нанопорошки обладают близким модифицирующим эффектом независимо от химического состава, структурного типа и других параметров [5].

Независимо от влияния, которое наночастицы оказывают на кристаллизующийся сплав, они сохраняются в твердом композите как изолированные включения, влияют на процессы разрушения композитов, причем это влияние в значительной степени зависит от места их расположения по отношению к границам дендритов и зерен.

Задача введения наночастиц в расплав и их равномерного распределения в объеме суспензии решается преимущественно за счет применения механического и МГД-замешивания частиц, при этом порошки армирующих частиц могут вводиться инъекцией в струе нейтрального газа, в виде таблеток, брикетов, порошковой проволоки, протяженных прессованных композиций. Эффективен способ введения наночастиц в расплав в виде наноразмерных порошковых композиционных материалов (НПКМ), получаемых методом механолегирования [6].

Рядом преимуществ обладает метод плазменного синтеза в сочетании с двухплоскостным МГД-перемешиванием [7, 8]. Двухплоскостное МГД-перемешивание широкоинтервальных

сплавов, в частности доэвтектических силуминов, в жидком и двухфазном состояниях позволяет одновременно решать задачи равномерного распределения частиц в объеме расплава и вырождения дендритной структуры, дает возможность использования всех преимуществ тиксолития для получения нанокompозитов [9]. В частности, применение избыточного давления при тиксоформовке позволяет избавиться от газовой пористости в заготовке.

Работы отечественных [10] и зарубежных [11] исследователей показывают, что одним из эффективнейших методов воздействия на процессы формирования структуры сплавов является их обработка в жидком и двухфазном состояниях мощным ультразвуком. Ультразвук диспергирует, распределяет и разрушает наноразмерные кластеры, при сочетании ультразвуковой обработки в режиме кавитации с введением модификаторов зародышевого типа в отливке формируется вырожденная дендритная структура.

Эффективность влияния ультразвука ослабевает при удалении от излучателя, поэтому целесообразно использовать эффект УЗ-обработки совместно с МГД-перемешиванием. Задача введения наночастиц в расплав может быть упрощена за счет предварительного получения высокопроцентных нанокompозитных лигатур с последующим введением их в расплавы. При получении градиентных нанокompозитных изделий может использоваться технология центростремительного литья.

Задача обеспечения седиментационной устойчивости расплава, предотвращения агрегации наночастиц при непосредственной подаче композиции в формообразующую полость, а также при рециклинге композитов и повторном нагреве перед формообразованием ранее полученных нанокompозитных шихтовых заготовок решается в зависимости от варианта получения изделий из нанокompозитов.

При непосредственной транспортировке суспензии в формообразующую полость целесообразно использовать метод композиционного литья (Comprocasting), при этом интересные перспективы открывает использование для этих целей турбоиндукционных печей [12] и МГД-насосов [13].

Наиболее легко реализуемый вариант – порционная заливка суспензии в формообразующую полость.

При приготовлении композита в виде шихтовой заготовки для тиксоформовки предпочтительно использование процесса полунепрерывного литья, который позволяет обеспечить эффективный ввод дисперсных частиц в расплав (инжекция с помощью инертного газа, порошковая проволока и др.), их перемешивание, вырождение дендритов твердого раствора (МГД-перемешиватель, УЗ-обработка). Полное вырождение дендритной структуры дает возможность мерную заготовку нагревать только до технологической температуры формообразования. С этой точки зрения заслуживают внимания работы, направленные на интенсификацию процессов вырождения дендритов за счет комплексного электротокowego воздействия [14].

Расширение номенклатуры материалов, пригодных для тиксолития, за счет деформируемых твердорастворных сплавов типа АД31 [15] позволяет использовать их как основы для получения нанокompозитов при тиксоформовке.

Перспективны разработки в области получения НАКС с использованием в качестве армирующих комплексов нанокompозитных материалов, в частности фуллеренов C_{60} , нанотрубок,

наноалмазов, наноразмерных продуктов модифицирования природных углеродосодержащих пород (шунгитов) [16-18].

Развитие процессов тиксоформовки (тиксолитья, тиксоштамповки) показывает, что исследование и разработка этих процессов делает особенно перспективным сотрудничество литейщиков и специалистов в области пластической обработки сплавов. При этом литейщики призваны решать вопросы обеспечения «прокатчиков» заготовками для тиксоштамповки. Предметом общих интересов могут стать и совместные работы в области получения листовых и профильных изделий из нанокompозитов методами бесслитковой прокатки.

В настоящее время бурно развиваются гранульные технологии, в частности новое материаловедческое направление – наноструктурные гранульные композиты, объединяющее достоинства гранульной металлургии и принципы создания объемного композиционного материала из гранул. Для компактирования используются, как правило, всестороннее гидро- или газостатическое прессование [19]. С учетом опыта литейщиков в области суспензионного литья, возможности использования наноструктурных гранул для введения наночастиц в расплав представляется весьма перспективным сотрудничество литейщиков и специалистов гранульной металлургии в области разработки гибридных процессов, способных, в конечном итоге, обеспечивать получение фасонных изделий из нового класса нанокompозитов.

Вопросы получения изделий из нанокompозитов с использованием жидкофазных технологий требуют системного подхода к решению всего комплекса возникающих проблем, привлечения специалистов в различных областях знания (термодинамики, физико-химии расплавов и физики твердого тела, механики разрушения, технологии получения и обработки сплавов в жидком, двухфазном и твердом состояниях, компьютерных технологий, сварки, механической обработки).

Решение этой комплексной проблемы возможно при участии многопрофильных научных учреждений, которыми, в первую очередь, служат научно-исследовательские (политехнические) университеты.

Заключение

1. Основными изделиями, на которые в настоящее время ориентированы отечественные разработки НАКС, являются детали триботехнического назначения и жаропрочные композиты для ЦПГ ДВС. Перспективны для применения НАКС и другие области машиностроения, в частности нефтедобывающая и нефтеперерабатывающая промышленность.

2. Теория наноструктурных металломатричных, в частности алюмоматричных, композиционных сплавов находится в стадии становления. Необходимо выяснить роль наночастиц различного состава и происхождения в процессах кристаллизации и перекристаллизации композитов, в процессах разрушения изделий в различных условиях эксплуатации, что требует, в частности, определения теплофизических характеристик композитов, разработки соответствующих математических и физических моделей.

3. При разработке нанокompозитов необходимо не только исходить из заданного комплекса их механических и специальных свойств, но рассматривать в качестве обязательных конструктивные особенности конкретных заготовок (деталей), метод их получения, особенности механической и термической обработок.

4. Представляется целесообразным дальнейшие работы в области получения фасонных изделий из НАКС ориентировать в следующих направлениях:

- в качестве матричных использовать широкоинтервальные и твердорастворные сплавы, обеспечивающие возможность их обработки в жидком и двухфазном состояниях;
- при порционной обработке расплава или полунепрерывном литье заготовок использовать комплексы из микроразмерных частиц элементов-носителей (медь, переходные металлы) и тугоплавких наночастиц, получаемые механолегированием, а также гранульные нанокompозиты при их введении в виде прессованных брикетов, порошковой проволоки с помощью газовой инъекции;
- равномерное распределение наночастиц в объеме расплава обеспечивать за счет комплексного использования в оптимальных режимах процессов МГД-перемешивания и УЗ-обработки, при этом ориентируясь на реализацию одностадийности процесса полного вырождения дендритов твердого раствора и создания тиксотропной структуры;
- в качестве основного метода получения готовых изделий из НАКС использовать методы формообразования нанокompозитов в двухфазном состоянии (тиксолитье, тиксоштамповка, композиционное литье);
- применять для достижения заданного уровня свойств НАКС в готовых изделиях весь арсенал достижений в области плавки, обработки в жидком, двухфазном и твердом состояниях матричных сплавов;
- рассматривать работы в области создания НКАС как базу для разработки нанокompозитов на основе других сплавов, в первую очередь магниевых.

Список литературы

- [1] Амосов А.П. // Вестник СамГТУ, сер. Технические науки. 2007. № 2(20). С. 77.
- [2] Кондратенко А.Н., Голубкова Т.А. // Конструкции из композиционных материалов. 2009. № 1. С. 24.
- [3] Lilian Ivanchev, Siggibo Templeton Camagu, Gonasagren Govender // J. Solid State Phenomena. 2013. Vol. 192193. P. 61.
- [4] Панфилов А.В., Петрунин А.В., Панфилов А.А. // Литейщик России. 2008. № 7. С. 42.
- [5] Крушенко Г.Г., Решетникова С.Н. // Вестник СибГАУ. 2007. Вып. 3(16). С. 103.
- [6] Косников Г.А., Баранов В.А., Петрович С.Ю., Калмыков А.В. // Литейное производство. 2012. № 2. С. 4.
- [7] Борисов В.Г. // Металлург. 2008. № 11. С. 102.
- [8] Косников Г.А., Колесов С.С. // Труды VII съезда литейщиков России. Новосибирск, 2005. Т. 1. С. 298.
- [9] Семенов Б.И., Куштаров К.М. Производство изделий из металла в твердожидком состоянии. Новые промышленные технологии. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 223 с.
- [10] Приходько В.М., Абрамов О.В., Эльдарханов А.С. Мощный ультразвук в металлургии и машиностроении. М.: Янус-К, 2006. 688 с.
- [11] Michael De Cicco, Lih Sheng Turng, Xiao Chun Li, John H. Perepezko // Proceedings of 10th International Conference on Semi-Solid Processing of the Alloys and Composites S2P 2008,

September 16th-18th, 2008 Aachen, Germany and Liege, Belgium. Ed. G. Hirt, A. Rassili, A. Buhrig-Polaczek. TTP Trans Tech Publications LTD, Switzerland

[12] Лузгин В.И., Петров А.Ю., Рачков С.А. и др. // Литейное производство. 2010. № 3. С. 12.

[13] Найдек В.Л. // Литейное производство. 2009. № 11. С. 6.

[14] Борисов Г.П., Борисов А.Г., Цуркин В.Н. и др. // Процессы литья. 2012. № 3. С. 32.

[15] Косников Г.А., Колесов С.С. // Литейщик России. 2007. № 4. С. 28.

[16] Евдокимов И. А., Прусов Е. С., Куреев А. В. // Ползуновский альманах. 2010. № 2. С. 264.

[17] Prokhorov V.M., Blank V.D., Pivovarov G.I., Solovyeva L.F. // Proc. Int., Sci. Conf. New promising materials and processes of their preparation (NPM-2004). Volgograd, 2023 Sept., 2004. P. 124

[18] Кондратенко А.Н., Голубкова Т.А. // Конструкции из композиционных материалов. 2009. № 1. С. 29.

[19] Москвичев Ю.П., Панин В.И., Агеев С.В. и др. // Actual Conference. 2011. № 1(70). С. 44.

Liquidphase Production Technologies of Alumomatrix Nanocomposit Billets (Review)

Gennady A. Kosnikov

*St.Petesburg State Politechnical University,
29 Politechnicheskaya Str., St.Petersburg, 195251, Russia*

Liquidphase production technologies of alumomatrix nanocomposit billets are considered. Complex using of magnetohydrodynamic stirring, ultrasonic treatment of suspension during liquid and liquidsolid states and thixoforming advantages are proposed.

Keywords: alumomatrix nanocomposities, liquidphase technologies, magnetohydrodynamic stirring, ultrasonic treatment, semicontinuous casting, thixoforming, billets.
