

УДК 669.018.25  
ББК 34.33

*Т. А. Чернышова, И. Е. Калашников*  
*г. Москва, Россия*  
*А. Т. Волочко, С. А. Астапчик*  
*г. Минск, Беларусь*

### **Наноструктурирование алюмоматричных композиционных материалов, изготавливаемых реакционным литьём**

Обсуждается совместный проект ИМЕТ РАН и ФТИ НАНБ «Наноструктурирование алюмоматричных композиционных материалов, изготавливаемых реакционным литьём: теория и технология». Цель проекта – изучение влияния реакционно активных добавок и тугоплавких наночастиц на структурное модифицирование, механические и триботехнические свойства алюмоматричных КМ, полученных в процессах *in-situ*.

*Ключевые слова:* композиционные материалы, алюминиевые сплавы, реакционное литьё, триботехнические свойства.

*T. A. Chernyshova, I. Ye. Kalashnikov*  
*Moscow, Russia*  
*A. T. Volochko, S. A. Astapchik*  
*Minsk, Belarus*

### **The Nanoconstruction of Aluminum Matrix Composite Materials Produced by Reaction Casting**

The joint project of IMET RAS together with PTI NASB "The nanoconstruction of aluminum matrix composite materials produced by reaction casting: theory and technology" is discussed. The purpose of this project is to study the effect both of reactivity additions and refractory nanoparticles on the structural modification, and on mechanical and tribotechnical properties of an in-situ aluminum-matrix composites (AMCs).

*Keywords:* composite materials, aluminum alloys, reaction casting, tribotechnical properties.

Композиционные материалы (КМ) на базе легких сплавов, дискретно армированные тугоплавкими высокопрочными, высокомодульными наполнителями, являются перспективным материалом для ответственных конструкций новой техники, работающих при повышенных температурах в условиях интенсивного износа. Однако их широкое промышленное применение сдерживается опасностью развития химического взаимодействия между матрицами и дискретными наполнителями, приводящего к деградации свойств наполнителя, появлению охрупчивающих матрицу межфазных продуктов и ослаблению связи по границам раздела наполнитель/матрица. Высокая стоимость большинства армирующих наполнителей, сложность технологий их совмещения с матрицами, трудности механообработки готовых КМ являются другими факторами, ограничивающими их внедрение в промышленность. Эффективным способом повышения служебных свойств КМ – высокотемпературной прочности, жесткости, несущей способности, износостойкости, а также снижения стоимости и повышения технологичности КМ может стать трансформационное упрочнение, или осуществление синтеза армирующих компонентов непосредственно в процессах изготовления КМ.

Вариантом трансформационного упрочнения КМ может быть образование *in-situ* (по месту) тугоплавких высокопрочных оксидных, нитридных, карбидных или интерметаллидных армирующих фаз в результате химических реакций между матрицей и добавками реакционно активных металлов, газов или химических соединений. Химические реакции *in-situ* формируют в матрице равновесные армирующие фазы, термодинамически стабильные, не имеющие загрязнений на поверхности, с лучшими межфазными свойствами (смачиваемостью). Процесс синтезирования новых

фаз в случае жидкофазного совмещения матричных сплавов с реакционно-активными добавками получил название «реакционного литья».

В присутствии дополнительно вводимых в расплав наноразмерных тугоплавких модификаторов могут быть обнаружены принципиально новые эффекты наноструктурирования КМ. Дисперсность и распределение синтезированных в расплаве фаз зависит от агрегатного состояния, фракционного состава вводимых добавок, термических эффектов взаимодействия с расплавом, режимов литья и обработки расплавов. Контролируя параметры процесса, вид, объемную долю и порядок введения тугоплавких наномодификаторов, можно влиять на размеры новых синтезированных фаз, структуру матрицы, качество связи по поверхностям раздела наполнитель/матрица и физико-механические свойства КМ. Дополнительное функциональное упрочнение КМ может быть достигнуто под действием внешних сил (механоактивации исходных компонентов, ультразвуковой обработки расплава, центробежного литья, оплавления поверхности КМ лучом лазера, электрической дугой, пластической деформации, термомеханической обработки и пр.).

Идея трансформационного упрочнения КМ реализуется в рамках научного проекта №10-08-90017 Бел-а, поддерживаемого грантом БРФФИ-РФФИ: «Наноструктурирование алюмоматричных композиционных материалов, изготавливаемых реакционным литьём: теория и технология». Проект направлен на решение фундаментальной научной проблемы создания новых дисперсно наполненных КМ на базе сплавов алюминия с повышенными прочностью, жаропрочностью и износостойкостью для нужд моторостроения.

Предусматривается осуществление различных технологических вариантов совмещения реакционно активных компонентов. Принципиально новыми являются предлагаемые способы введения наноразмерных добавок, в том числе посредством порошковых преформ или так называемых «носителей»; осуществление механохимического синтеза порошковых смесей, содержащих алюминий, карбамид, оксиды, карбиды, нитриды, борсодержащие вещества (буру  $Na_2B_4O_7$ , борную кислоту  $H_3BO_2$ ); проведение термомеханической обработки порошков субмикроструктурного кремнезёма и нитрида бора в средах, основанных на гидридах бора и титана. Будут исследованы процессы гетерофазного зародышеобразования новых синтезированных фаз в присутствии наноразмерных модификаторов в зависимости от их природы, типа связи, решеточного соответствия (смачивания). Будут проанализированы термические эффекты, сопровождающие трансформационное упрочнение, исследована структура, расшифрован состав продуктов межфазных реакций, проведены испытания механических свойств и коррозионные испытания в диапазоне рабочих температур. Завершающим этапом разработки явится исследование закономерностей трибологического поведения КМ новых составов при различных видах и параметрах нагружения; возможностей механообработки, в том числе лезвийной, новых КМ.

Целесообразность совместной работы ИМЕТ РАН и ФТИ НАН обусловлена комплексным характером исследований, направленных на оценку возможностей повышения эксплуатационных свойств литых алюмоматричных КМ и расширения областей их применения. В работе принимают участие: Л. И. Кобелева, Л. К. Болотова (ИМЕТ РАН); В. В. Овчинников, А. Ю. Изобелло (ФТИ НАН).

Общими являются объекты исследования – алюминиевые сплавы, армированные высокопрочными, высококомодульными наполнителями, в том числе наноразмерными; технологии совмещения компонентов – жидкофазные процессы пропитки, механическое замешивание частиц в расплав, введение в расплав лигатур и реакционно активных добавок; цели работы – разработка новых модификаторов, режимов обработки, совмещения компонентов и последующих воздействий для достижения наноструктурирования и высоких эксплуатационных свойств; уточнение номенклатуры изделий, где целесообразна замена традиционных конструкционных материалов на КМ.

Российская сторона обладает опытом изготовления КМ на базе литейных алюминиевых сплавов, а также сплавов, легированных модифицирующими добавками Sc, B, Ti, Ni и др., армированных керамическими микро- и нанодобавками, в том числе синтезированными в плазме [8–11]. Проведены модельные опыты по осуществлению реакционного литья, оценке эволюции структуры в присутствии наночастиц и расшифрованы продукты межфазных реакций [11, 12]. Произведена оценка механических и трибологических свойств некоторых КМ в зависимости от последующих вариантов обработки (центробежного литья, лазерного, дугового оплавления в магнитном поле, ИПД, термических обработок) [6, 7, 11].

В ФТИ НАН Беларуси имеется опыт литья алюминиевых сплавов, механического синтеза порошковых материалов, разработки новых составов лигатур и модификаторов [2, 5]. Активно про-

водятся исследования кинетики и механизмов структурирования при обработке алюминиевых расплавов лигатурами, содержащими дисперсные тугоплавкие частицы и органические соединения, например, карбамид  $(NH_2)_2C$ , которые, разлагаясь, образуют атомарный азот, являющийся источником образования наноразмерных инокуляторов – нитридных фаз, обеспечивающих объемное наноструктурирование КМ [1, 3, 4]. Это направление работ представляет наибольший интерес для совместного анализа и развития.

В результате выполнения проекта будут установлены механизмы и закономерности фазовых превращений на различных стадиях формирования наноструктурированных металломатричных КМ, что позволит разработать эффективную технологию их получения с учетом выявленных особенностей стадийности синтеза дисперсных частиц; будет обоснован выбор состава модификаторов, лигатур, легирования сплавов основы. По результатам, полученным при выполнении проекта, будут созданы КМ нового поколения, отличающиеся высокими физико-механическими и эксплуатационными свойствами. Благодаря дисперсности керамических фаз, их функциональному распределению, модифицированию структуры матриц появляется возможность лезвийной обработки изделий, полученных реакционным литьем.

Полученные материалы будут применены при создании объектов новой техники, отличающихся высокими эксплуатационными характеристиками, в частности, при изготовлении поршней высокофорсированных двигателей внутреннего сгорания, соответствующих экологическим нормам Евро-5 и выше, компрессоров автомобильной и космической техники, подшипников турбокомпрессоров, работающих при повышенных нагрузочно-скоростных условиях, тормозных пар в авто- и авиационной, труб для нефтегазового комплекса, работающих в условиях резкого перепада температур и агрессивных сред.

#### Список литературы

1. Волочко А. Т. Керамические огнеупорные материалы для литейного производства алюминия и его сплавов // Современные технологии металлообработки: материалы междунар. науч.-техн. конф.; под. ред. А. С. Астапчика и др. Мн.: Экоперспектива, 2005. С. 329–336.
2. Волочко А. Т. Переработка и использование алюминиевых отходов в производстве порошков, паст, композиционных и керамических материалов. Минск: Бел. наука, 2006. 302 с.
3. Волочко А. Т. Процессы получения изделий в твёрдожидком состоянии // Инженер-механик. 2007. № 1. С. 5–10.
4. Волочко А. Т., Макарова Ж. Е. Формирование алюминиевых изделий в твёрдожидком состоянии с использованием дополнительных порошков сплава-припоя // Вести ПГУ. Прикладные науки. 2005. № 6. С. 157–162.
5. Волочко А. Т., Марков Г. В., Овчинников В. В. О тепловом режиме сушки стружечных отходов алюминиевых сплавов // Литейное производство, 2006. № 2. С. 24–26.
6. Михеев Р. С., Чернышова Т. А., Чернышов Г. Г., Коберник Н. В., Кобелева Л. И. Влияние импульсного лазерного излучения на структуру и свойства алюмоматричных композиционных материалов, армированных частицами SiC // ФизХОМ. 2006. № 6. С. 17–22.
7. Михеев Р. С., Рыбачук А. М., Кобелева Л. И., Коберник Н. В., Чернышов Г. Г. Обработка поверхности антифрикционных алюминиевых сплавов дуговым оплавлением в магнитном поле // Заготовительные производства в машиностроении. 2009. № 5. С. 13–16.
8. Чернышова Т. А., Плишкин Д. И., Кобелева Л. И. Влияние добавок скандия на структуру и свойства композиционного материала системы алюминиевый сплав – частица карбида кремния // ФизХОМ, 1999, №5, с. 85–90.
9. Чернышова Т. А., Кобелева Л. И., Болотова Л. К., Калашников И. Е. Трибологические характеристики алюмоматричных композиционных материалов, упрочненных наноразмерными наполнителями // Трение и износ, 2005. Т. 26, № 4. С. 446–450.
10. Чернышова Т. А., Кобелева Л. И., Болотова Л. К., Панфилов А. В., Панфилов А. А. Функционально армированные алюмоматричные композиционные материалы, изготовленные центробежным литьем. Перспективные материалы // Материалы IX Российско-китайского симпозиума «Новые материалы и технологии», 2007. Т. 1. Т. 2. С. 269–272.
11. Чернышова Т. А., Кобелева Л. И., Калашников И. Е., Болотова Л. К. Новые алюмоматричные композиционные материалы триботехнического назначения: принципы создания и перспективы. Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН – 70 лет // сб. научных трудов под ред. академика К. А. Солнцева. М.: Интерконтакт Наука, 2008. 736 с.

12. Чернышова Т. А., Калашников И. Е., Самохин А. В., Алексеев Н. В., Болотова Л. К., Кобелева Л. И. Исследование модифицирующего влияния добавок нанопорошков, полученных плазмохимическим синтезом, на структуру литых алюмоматричных КМ // Российские нанотехнологии, 2009. Т. 4. № 5–6. С. 20–25.

**Рукопись поступила в издательство 28 мая 2011 г.**