



УДК 536.74

П.Д. Гудкова, А.Р. Луц
ФГБОУ ВО «Самарский государственный
технический университет»
г. Самара, Российская Федерация
E-mail: alya_luts@mail.ru
Дата поступления 22.11.2019

ПОЛУЧЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКИХ ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ СИСТЕМЫ Al-SiC-TiC МЕТОДОМ СВС

Аннотация

В статье представлен метод получения дисперсно-упрочненных композиционных материалов системы Al-SiC-TiC с применением технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). С помощью комплекса программ «Thermo» был проведен термодинамический анализ, который показал, что совместный синтез частиц карбида кремния и карбида титана в расплаве алюминия является экзотермичным и приводит к росту адиабатической температуры системы до значений 1500-2000 К (в зависимости от начальной температуры расплава), что является благоприятным значением для осуществления СВС в расплаве алюминия. Рассчитаны оптимальные концентрации армирующих фаз SiC, TiC, разработана методика получения композита. Проведенные металлографический и локальный рентгеноспектральный анализы подтвердили наличие целевых фаз в составе композиционного материала. Приводятся показатели твердости и электропроводности образцов состава Al-(2-6)%SiC-10%TiC.

Ключевые слова: дисперсно-упрочненный композиционный материал; самораспространяющийся высокотемпературный синтез; шихта, адиабатическая температура; твердость; электропроводность.

Введение

В настоящее время актуальной научно-технической задачей в области заготовительных производств является создание новых конструкционных материалов, обладающих комплексом свойств, необходимых для объектов современной техники. Одним из наиболее перспективных путей в этом направлении является разработка новых композиционных материалов, применение которых позволяет существенно повысить механические и эксплуатационные свойства деталей. Среди композитов на первом месте по объему применения выделяют алюмоматричные композиционные материалы, основными преимуществами которых являются высокие показатели электро- и теплопроводности, теплоемкости, значительные технологические свойства и низкий вес. Введение в алюминиевую матрицу армирующих наполнителей повышает прочность, вязкость разрушения

и несущую способность материала при незначительном увеличении массы. Дисперсно-наполненные композиционные материалы на основе алюминиевых сплавов обладают наилучшим сочетанием механических и триботехнических свойств, что определяет значительную перспективность их применения в промышленности [1]. В работах И.Н. Фридляндера, Т.А. Чернышовой, Ю.А. Кургановой, И.Е. Калашникова, А.А. Аксенова, Р.С. Михеева и др. (Россия), A.R. Kennedy, M.M. Makhlof, P.K. Rohatgi, A.A. Baker, S. Das, B.K. Prasad, M.C. Breslin, A.T. Alpas, M.K. Surappa, Y. Wang и др. (Англия, США, Япония, Германия, Китай, Индия), сообщается о разработке и применении новых композиционных материалов систем с армирующими частицами различной природы: оксидами, гидридами, боридами, карбидами и т.д. [2-5].

На сегодняшний день наиболее изученными считаются композиты, армиро-

ванные частицами карбида кремния, отличающиеся высокой прочностью, модулем упругости и хорошим сопротивлением термическому удару [6]. Более того, они уже находят широкое применение для изготовления тормозных дисков автомобилей и скоростных поездов («ICE», «Shinkansen»), при производстве тормозных барабанов («Volkswagen») или локально упрочненных блоков цилиндров и поршней («Porsche», «Toyota») [7]. Но наиболее перспективным из всего их многообразия армирующих фаз для алюмоматричных композитов считается карбид титана, обладающий еще более высокими значениями твердости и модуля упругости [8]. Кроме того, как показано в работе [9], карбид титана - единственный из применяемых в настоящее время армирующих компонентов, который помимо собственных высоких механических свойств, обладает также сильным модифицирующим действием (вследствие близости типа и размеров кристаллической решетки с алюминиевой), что также способствует повышению прочностных и пластических свойств получаемых композитов.

Еще один фактор, который обязательно следует принимать во внимание – способ получения композиционного материала, поскольку именно от технологии производства зависит возможность введения заданного количества армирующей фазы, качество ее распределения по объему материала и, соответственно, конечные свойства. Методы производства подразделяют на твердо- и жидкофазные, в зависимости от состояния матричного металла [10]. К твердофазным относятся методы порошковой металлургии, механического легирования, спекания, прессования и др., но их применение зачастую ограничено высокой стоимостью производства, а также ограничениями по размерам и формам получаемых заготовок. Применение жидкофазных способов, практикующих использование расплава матричного алюминия, является экономически более оправданным, поскольку позволяет использовать недорогое литейное оборудование и получать отливки согласно заданным требованиям. Жидкофазное соединение компонен-

тов композиционных сплавов может осуществляться двумя способами: введением готовых армирующих частиц в матричный расплав (экзогенное или т.н. ex-situ), например, механическим замешиванием, и за счет проведения химической реакции синтеза упрочняющих частиц непосредственно в расплаве (эндогенное или т.н. in-situ). Одним из наиболее перспективных методов in-situ за счёт своей простоты, энергоэффективности и производительности признан процесс самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) в расплаве. Суть его состоит в том, что экзотермическая смесь порошковых компонентов вносится в разогретый расплав алюминия, эта смесь нагревается, а затем в локальной точке самопроизвольно инициируется реакция между порошковыми компонентами. Поскольку реакция экзотермическая, то далее, за счет выделения собственного тепла, происходит поэтапный нагрев всей порошковой шихты и, соответственно, реакция СВС распространяется по объему расплаву со значительной скоростью, результатом чего является образование композиционного материала в течение малого промежутка времени (весь объем плавки занимает не более 5 минут) [11].

Известно немало работ, посвященных отдельному получению композитов систем Al-TiC [12-14] и Al-SiC [15-17] различными способами, однако в последнее время также предпринимаются попытки совместить эти две армирующие фазы в составе композиционного материала, что позволило бы получить чрезвычайно высокие показатели механических и триботехнических характеристик. Так, например, в работе [18] показана возможность получения композитов состава Al-15 масс.% SiC-7 масс.% TiC с помощью метода спекания при 650 и 750 °С. Отмечается, что совместное присутствие карбидных фаз позволяет получить высокие характеристики: относительную плотность композита ($96,32 \pm 0,3$), прочность на изгиб (340 ± 14 МПа) и микротвердость (192 ± 10 по Виккерсу). Однако гораздо более перспективным выглядит получение подобного композиционного материала с применением передового метода СВС, что

и было поставлено целью настоящего исследования.

Основная часть

Термодинамические исследования выполнялись с применением комплекса программ "Thermo", разработанного в Институте структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мерзанова Российской академии наук (г.Черноголовка) для осуществления расчетов термодинамического равновесия в сложных многоэлементных гетерофазных системах. При получении сплавов Al-SiC-TiC следует учитывать, что реакция образования SiC слабоэкзотермична, поэтому расчеты велись в предположении, что выделение значительного количества тепла в ходе образования TiC (183 кДж) активизирует процесс синтеза SiC. Анализ показывает, что совместный синтез частиц карбида титана и карбида кремния в расплаве алюминия, является экзотермичным и приводит к росту адиабатической температуры системы до значений выше 2000 К, что является благоприятным значением для осуществления СВС в данной системе. Также в ходе термодинамических исследований было изучено влияние количественного соотношения армирующих фаз и возможность их совместного синтеза в расплаве алюминия. Как и следовало ожидать, наибольшие адиабатические температуры получены при условии синтеза максимально возможного для практической реализации количества фазы карбида титана (10 масс.%). Далее, по мере увеличения доли фазы карбида кремния, полученные значения температуры системы снижаются, однако прогнозируемых значений (1500-2000 К), тем не менее, достаточно для реализации синтеза обеих целевых фаз. На основании проведенных расчетов было принято решение проводить экспериментальный синтез композиционных материалов составов: Al-2%SiC-10%TiC, Al-4%SiC-10%TiC, Al-6%SiC-10%TiC (количество армирующих фаз приведено в массовых долях).

Для приготовления композиционных материалов состава Al-SiC-TiC были использованы: алюминий чушковый А7 (ГОСТ 11069-74), порошок титана ТПП-7

(ТУ 1715-449-05785388), порошок технического углерода П-701 (ГОСТ 7585-86), порошок кремния КР-0 (ГОСТ 2169-69), галогидная соль Na_2TiF_6 (CAS 17116-13-1). Первоначально производилась подготовка СВС-шихты стехиометрического состава из порошков титана, кремния и углерода. Для этого смеси порошков сначала подвергались механической активации в шаровой мельнице в течение 1 часа, а затем распределялись по брикетам из алюминиевой фольги толщиной 50-100 мкм (ТУ1811-005-53974937-2004) по 5-8 г. В часть брикетов с целью активизации СВС-реакции добавлялась соль Na_2TiF_6 в количестве 3% от массы шихты. Далее в приготовленный расплав алюминия, нагретый до 900°C, осуществлялся поочередный ввод брикетов с шихтой и их выдержка до инициации реакции СВС, сопровождающейся искро- и газовыделением (в течение 5-10 сек. после ввода). Технология получения композиционного материала состава Al-SiC-TiC представлена на рисунке 1.

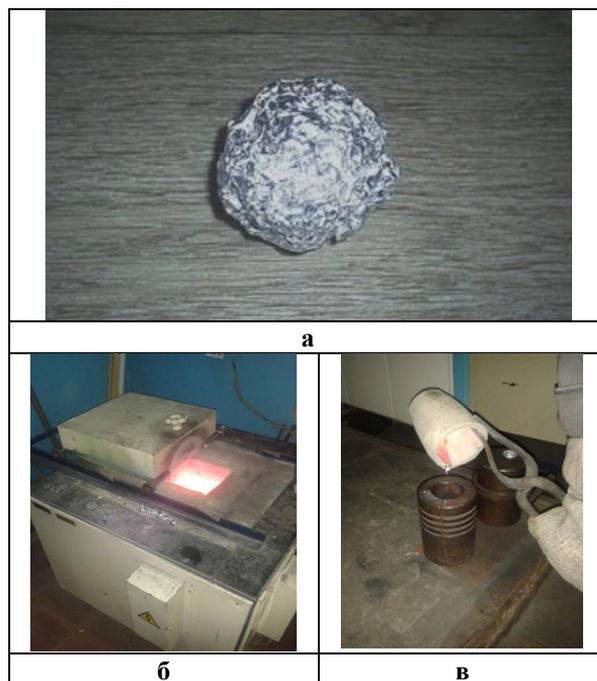


Рисунок 1. Технология получения композиционного материала состава Al-SiC-TiC:

- общий вид брикета из алюминиевой фольги с СВС-шихтой;
- плавильная печь ПП 20/12 с разогретым расплавом алюминия;
- заливка композиционного материала в кокиль

Изготовление металлографических шлифов проводили на шлифовально-полировальной машине ПОЛИЛАБ П12МА с приставкой для работы в автоматическом режиме. Применяли алмазные суспензии Ака-топо дисперсностью 6 мкм, 3 мкм и 1 мкм. Для выявления микроструктуры проводили травление образцов раствором 50% HF+50% HNO₃ в течение 10 ÷ 15 секунд. Металлографический анализ осуществляли на растровом электронном микроскопе Jeol JSM-6390A. Элементный химический состав определяли методом локального рентгеноспектрального анализа (ЛРСА) на этом же микроскопе с использованием приставки Jeol JED-2200. Концентрацию компонентов определяли, как среднее значение из 4 ÷ 5 локальных измерений на различных участках. Твердость по методу Бринелля полученных экспериментальных образцов определяли на твердомере ТШ-2М по ГОСТ 9012-59. Для анализа электропроводности использовали вихретоковый структурокоп ВЭ-26НП производства МНПО «СПЕКТР» (г. Москва).

В ходе проведения синтеза в составе алюминиевого расплава фиксировалась активная СВС-реакция. Анализ микроструктуры показывает значительное количество образовавшихся включений (рисунок 2). Проведенный ЛРСА подтвердил, что синтезированные включения представляют собой фазы карбида кремния и карбида титана (рисунки 3, 4).

В заключение были проведены замеры твердости и электропроводности полученных образцов. Результаты представлены в таблице 1.

Заключение

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали, что реализация метода СВС в расплаве алюминия позволяет осуществить синтез композиционного материала состава Al-(2-6)%SiC-10%TiC с достаточными показателями твердости и электропроводности. Дальнейшие исследования планируется проводить в направлении исследования дополнительных механических характеристик (прочности и пластичности), а также осуществления синтеза с добавлением легирующих элементов в состав алюминиевой матрицы.

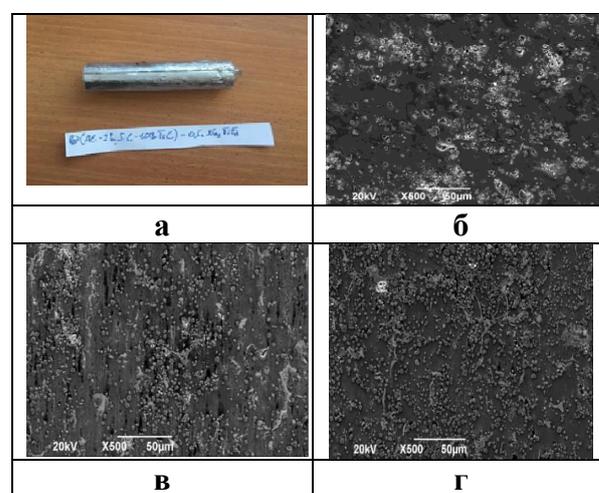
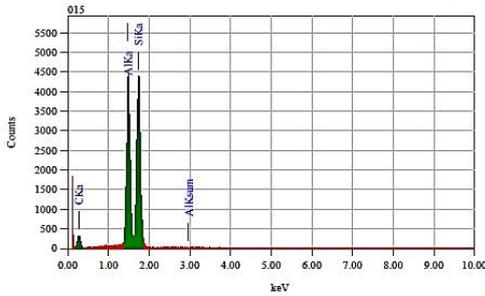
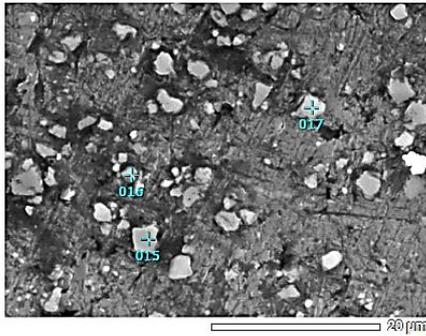


Рисунок 2. Общий вид и микроструктура образцов композиционного материала:

- а) общий вид образцов;
- б) Al-2%SiC-10%TiC;
- в) Al-4%SiC-10%TiC;
- г) Al-6%SiC-10%TiC

Таблица 1
Результаты исследования твердости и электропроводности образцов композиционного материала Al-(2-6) %SiC-10%TiC

Состав образца	Твердость (НВ)	γ, МСм/м
Al(A7)	25,0	36,0
Al-2%SiC-10%TiC	97,0	31,9
Al-4%SiC-10%TiC	101,0	26,9
Al-6%SiC-10%TiC	114,0	20,8

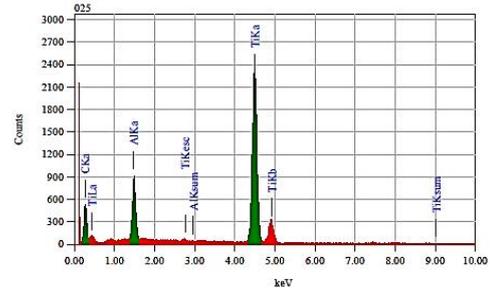
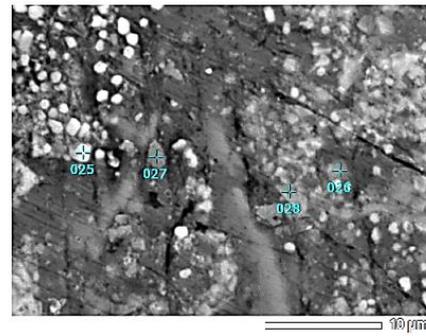


Element	Mass. %	Error, %	Atom, %
C	11,95	0,03	23,72
Al	44,14	0,02	39,01
Si	43,91	0,02	37,27
Total	100,00		100,00

Рисунок 3. ЛРСА образца Al-6%SiC-10%TiC

Библиографический список

1. Панфилов, Ал.А., Панфилов А.В., Кечин В.А. Трибологические характеристики алюмоматричных композиционных материалов, полученных in-situ процессом // Литейщик России. 2007. - №10.- С.22-24.
2. Аксенов А. А. Оптимизация состава и структуры композиционных материалов на алюминиевой и медной основе, получаемых жидкофазными методами и механическим легированием: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.01. Москва: РГБ, 2007. - 390 с.
3. Курганова Ю.А. Разработка и применение дисперсно упрочненных алюмоматричных композиционных материалов в машиностроении: дис. ... д-ра техн. наук: 05.16.06. Москва: РГБ, 2008. - 285 с.
4. Калашников И.Е. Развитие методов армирования и модифицирования структуры алюмоматричных композиционных материалов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.16.06. Москва: РГБ, 2011. - 428 с.
5. Михеев Р.С. Перспективные покрытия с повышенными триботехническими



Element	Mass. %	Error, %	Atom, %
C	21,90	0,02	50,38
Al	10,19	0,08	10,44
Ti	67,91	0,02	39,18
Total	100,00		100,00

Рисунок 4. ЛРСА образца Al-6%SiC-10%TiC

свойствами из композиционных материалов на основе цветных металлов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.16.06. - Москва: РГБ, 2018. - 442 с.

6. Стоякина Е.А., Курбаткина Е.И., Симонов В.Н., Косолапов Д.В., Гололобов А.В. Механические свойства алюмоматричных композиционных материалов, упрочненных частицами SiC, в зависимости от матричного сплава // Электронный научный журнал «Труды ВИАМ». 2018.- №2.
7. Березовский В.В. Получение и анализ структуры дисперсноупрочненных композиционных материалов системы Al-SiC с различным содержанием армирующей фазы // Авиационные материалы и технологии. 2014. - №56. – С. 17-23.
8. Панфилов А.В. Современное состояние и перспективы развития литых дискретно-армированных алюмоматричных композиционных материалов // Литейщик России. 2008. №7. С. 23-28
9. Луц А.Р., Амосов А.П., Ермошкин А.А., Ермошкин А.А., Никитин К.В., Тимошкин И.Ю. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез

- высокодисперсной фазы карбида титана из смесей порошков в расплаве алюминия. Изв.вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2013. № 3. С. 28-35.
10. Rana R.S., Purohit R., Das S. Review of recent studies in Al matrix composites. Int. J. of Scientific and Engineering Research. 2012. Vol. 3. No. 6. P. 1-16.
 11. Levashov E.A., Mukasyan A.S., Rogachev A.S., Shtansky D.V. Self-propagating high-temperature synthesis of advanced materials and coatings. Int. Materials Reviews. 2016.
 12. Samer N., Andrieux J., Gardiola B., Karnatak N., Martin O., Kurita H., Chaffron L, Gourdet S., Lay S., Dezellus O. Microstructure and mechanical properties of an Al-TiC metal matrix composite obtained by reactive synthesis. Composites: Part A. 2015. Vol. 72. P. 50-57.
 13. Jerome S. Synthesis and evaluation of mechanical and high temperature tribological properties of in-situ Al-TiC composites. Tribology International. 2010. Vol. 43. P. 2029-2036. DOI: 10.1016/j.triboint.2010.05.007.
 14. Song M. S. In situ fabrication of TiC particulates locally reinforced aluminum matrix composites by self-propagating reaction during casting. Materials Science and Engineering. 2008. Vol. A 473. P. 166-171.
 15. Hartaj Singh, Sarabjit, Nrip Jit. An overview of metal matrix composite: processing and SiC based mechanical properties/Journal of Engineering Research and Studies. – 2011. – Vol. II. – pp. 72-78.
 16. Yang Y., Lan J., Li X. Study on bulk aluminum matrix nano-composite fabricated by ultrasonic dispersion of nano-sized SiC particles in molten aluminum alloy// Material Science and Engineering. A380. 2004. – pp. 378-383.
 17. Adebisi A.A., Maleque M.A., Rahman M.M. Metal matrix composite brake rotor: historical development and product life cycle analysis // International Journal of Automotive and Mechanical Engineering. – 2011. – Vol. 4, pp. 471-480.
 18. Ghasali E., Yazdani-rad R., Asadian K., Ebadzadeh T. Production of Al-SiC-TiC hybrid composites powders prepared through microwave and conventional heating methods. J. of alloys and compounds. 2017. Vol. 690. P. 512-518.
 19. Тимошкин И.Ю. Разработка комплексных технологий получения мелкокристаллических лигатур для алюминиевых сплавов: дисс. ... канд. техн. наук. - Владимир.- 2011. – 188 с.

Information about the paper in English

P.D. Gudkova, A.R. Luts
 Samara State Technical University
 Samara, the Russian Federation
 E-mail: alya_luts@mail.ru
 Received 22.11.2019

PRODUCING WEAR-RESISTANT DISPERSION-STRENGTHENED COMPOSITES Al-SiC-TiC BY A SELF-PROPAGATING HIGH-TEMPERATURE SYNTHESIS METHOD

Abstract

The paper presents a method of producing wear-resistant dispersion-strengthened composites Al-SiC-TiC by self-propagating high-temperature synthesis (SHS). Applying Thermo software, the authors conducted a thermodynamic analysis showing that joint synthesis of silicon carbide and titanium carbide particles in molten aluminum was exothermic and resulted in a growth of adiabatic temperature of the system to 1500-2000 K (depending on initial temperature of molten aluminum), being a favorable value for SHS in molten aluminum. The authors calculated optimum concentrations of reinforcing phases SiC, TiC and developed a procedure to produce composites. Metallographic analysis and local X-ray spectrometry confirmed the presence of target phases in composites. The paper contains hardness and electrical conductivity values of Al-(2-6)%SiC-10%TiC samples.

Keywords: dispersion-strengthened composites, self-propagating high-temperature synthesis, charged materials, adiabatic temperature, hardness, electrical conductivity.
