



УДК 621.745, 669.715

Поступила 14.03.2017

ФИЗИКО–ХИМИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КОМПОНЕНТОВ СИСТЕМЫ Al/SiO_2 В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ СИНТЕЗА ЛИТЕЙНЫХ ДИСПЕРСНО–УПРОЧНЕННЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

PHYSICO–CHEMICAL INTERACTIONS BETWEEN COMPONENTS OF THE Al/SiO_2 SYSTEM IN METALLURGICAL SYNTHETIC PROCESSES OF CASTING PARTICULATE REINFORCED ALUMINUM ALLOYS

И. В. РАФАЛЬСКИЙ, Б. М. НЕМЕНЕНОК, Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: rafalski@mail.ru

I. V. RAFALSKI, B. M. NEMENENOK, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimost ave. E-mail: rafalski@mail.ru

Исследованы процессы физико-химического взаимодействия компонентов алюмоматричных композиций Al/SiO_2 при различных температурных режимах их обработки, обеспечивающие получение в расплавах алюминия алюмооксидной керамики и синтез дисперсно-упрочненных сплавов системы $Al-Si/Al_2O_3$. Введение дисперсных частиц кремниооксидной керамики осуществлялось методом их замешивания в расплав алюминия, находящимся в жидко-твердофазном состоянии. В процессе температурно-временной обработки композиций Al/SiO_2 реализован синтез алюмооксидной керамики с контактными поверхностными слоями, обеспечивающим самопроизвольное смачивание жидким алюминием.

The physicochemical interactions between components in the Al/SiO_2 aluminum matrix compositions under various temperature conditions of processing are studied. The synthesis of aluminum oxide ceramics in aluminum melts for the production of particulate reinforced $Al-Si/Al_2O_3$ alloys was performed. The addition of dispersed particles of silicon oxide ceramics was carried out by mixing into aluminum melt in a liquid-solid state. At the temperature-time processing of the Al/SiO_2 compositions, alumina ceramic with a contact surface layer providing spontaneous wetting with liquid aluminum is realized.

Ключевые слова. *Металломатричные композиты, реакционный синтез, дисперсно-упрочненные $Al-Si/Al_2O_3$ сплавы, жидко-твердофазные процессы.*

Keywords. *Metal matrix composites, reaction synthesis, particulate reinforced $Al-Si/Al_2O_3$ alloys, liquid-solid processes.*

Введение

Композиционные материалы на основе алюминия, или алюмоматричные композиционные сплавы (АКС), 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 алюминиевые сплавы в большинстве случаев инженерной практики не могут обеспечить потребителя [1]. Однако производство изделий из АКС до настоящего времени остается относительно высокзатратным процессом, а технологические способы получения таких сплавов, несмотря на все их большое разнообразие и видимый прогресс в разработке новых методов синтеза АКС, пока не привели к снятию имеющихся ограничений на массовое производство изделий из этих материалов [2–6].

Перспективным направлением в создании АКС является синтез литейных сплавов на основе алюминия с использованием металлургических жидкофазных и жидко-твердофазных технологий литья (реолитье, тиксолитье, комполитье) с использованием дисперсных неметаллических материалов, прежде всего оксида алюминия и карбида кремния [7–10]. 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. С целью снижения затрат на производство АКС предпринимаются попытки применения дешевых и недефицитных материалов, в том числе кремнезема, сажи, алюмосиликатов, порошкообразных отходов техногенных производств.

Одними из наиболее доступных и недефицитных для получения АКС являются керамические материалы на основе оксида кремния (кремнезем, порошки кварцевого стекла). Однако их использование в качестве армирующих наполнителей, несмотря на низкую стоимость, нельзя признать перспективным для получения дисперсно-упрочненных алюминиевых сплавов из-за способности SiO_2 вступать в реакцию с алюминием, что приводит к деградации армирующих фаз либо на этапе производства изделий, либо на этапе их эксплуатации. В связи с этим в рамках выполненных исследований разработаны альтернативные подходы, основанные на использовании кварцевых материалов в качестве исходного шихтового сырья для управляемого реакционного синтеза алюмооксидной керамики непосредственно в процессе металлургической обработки композиционных смесей Al/SiO_2 . В результате реакции SiO_2 с алюминием при разработанных технологических режимах обработки композиционной суспензии Al/SiO_2 , помимо оксида алюминия, происходит образование свободного кремния. Это позволяет использовать композиционные составы Al/SiO_2 также и в качестве металлургического сырья для производства традиционных литейных Al-Si сплавов (силуминов).

Методика исследования

Физико-химические процессы взаимодействия компонентов системы «алюминий–оксид кремния» изучали при использовании метода их совмещения в жидко-твердофазном (ЖТ) состоянии расплава алюминия при различных температурных режимах обработки алюмоматричных композиций. В качестве исходных материалов для приготовления АКС использовали алюминий марки А7, кварцевый песок марки 2К₂О₃.

Совмещение компонентов системы проводили в ЖТ состоянии расплава после его нагрева до температуры, превышающей температуру ликвидус. Кварцевые материалы в расплав вводили после удаления оксидной пленки с его поверхности при непрерывном перемешивании композиции до получения однородной массы.

Температурный режим обработки композиционных составов контролировали с помощью микропроцессорной системы термического анализа с использованием хромель-алюмелевых термопар, помещенных внутрь кварцевой трубки длиной 35 ± 5 мм с наружным диаметром не более 4,5 мм и внутренним не менее 3,0 мм. После проведения термического анализа композиций и их охлаждения до комнатной температуры проводили термическую обработку полученных образцов.

Полученные результаты и их обсуждение

Результаты металлографического анализа и рентгенофлуоресцентной спектроскопии композиций «алюминий–кварцевый песок» с содержанием кварцевого песка 10 % от массы алюминия после нагрева композиции до 550°C и выдержки при этой температуре 6 ч приведены на рис. 1 и в табл. 1.

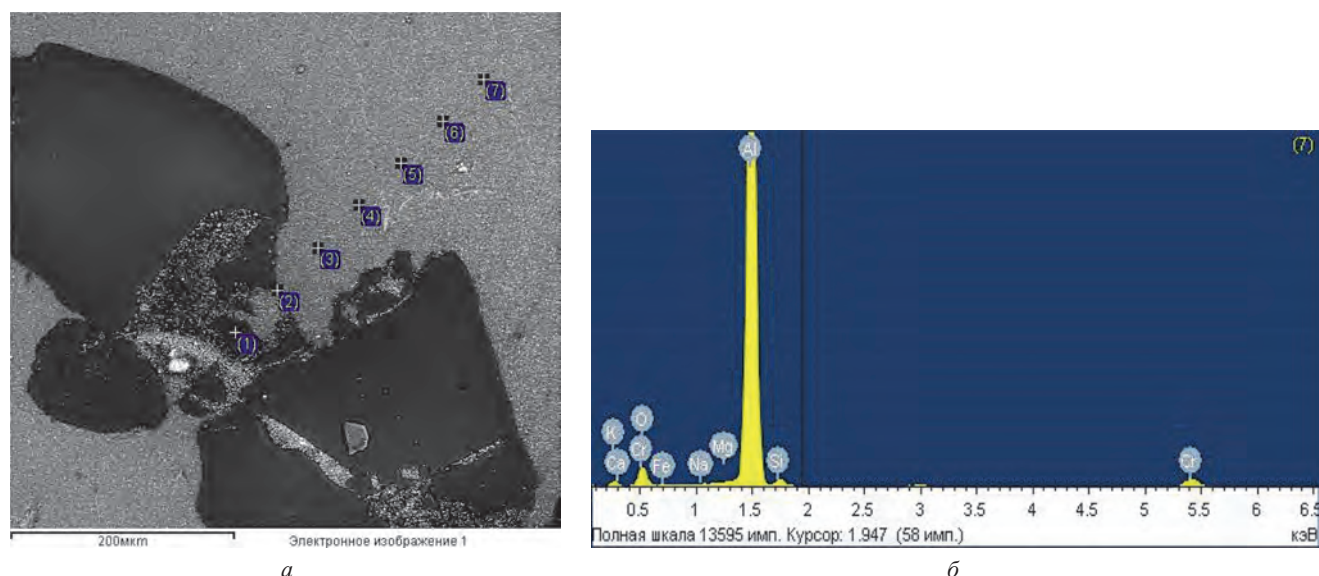


Рис. 1. Электронное изображение микроструктуры (а) и спектры рентгенофлуоресцентного излучения (б) АКС Al-10\%SiO_2 после нагрева композиции до 550°C и выдержки ее в течение 6 ч

Т а б л и ц а 1. Результаты микрорентгеновского анализа структурных составляющих участков образца (рис. 1) АКС системы Al-10%SiO₂ после нагрева композиции до 550 °С и выдержки в течение 6 ч

Спектр	Состав химических элементов, %							
	O	Na, K	Mg	Al	Si	Ca	Cr	Fe
1	40,95	0,10	0,05	19,13	35,74	0,00	4,00	0,03
2	16,13	0,14	0,00	66,75	12,58	0,00	4,31	0,09
3	12,44	0,00	0,00	76,65	7,53	0,02	3,33	0,03
4	14,14	0,06	0,00	74,90	5,36	0,00	5,46	0,08
5	12,25	0,05	0,00	79,00	4,23	0,00	4,40	0,07
6	12,29	0,03	0,01	80,06	3,35	0,00	4,17	0,09
7	12,96	0,03	0,01	79,31	2,52	0,00	5,13	0,04

Установлено, что после термической обработки (550 °С, 6 ч) АКС системы «алюминий–оксид кремния» вследствие протекания диффузионных процессов концентрация кремния при удалении от границы раздела фаз на расстоянии до 200 мкм постепенно снижается по сравнению с его начальным содержанием в оксидной фазе SiO₂ (табл. 1). Тем не менее, образования новых фаз не наблюдалось. Наличие хрома объясняется его присутствием в частицах оксида Cr₂O₃ на поверхности шлифа, использованного при полировании образца.

Более существенные изменения по границе раздела фаз системы «алюминий–оксид кремния» наблюдали после нагрева композиции до 700 °С (жидкое состояние металлической основы) и выдержки ее в течение 10 мин при этой температуре с последующим охлаждением АКС. В результате взаимодействия контактирующих фаз на поверхности частиц кварцевого песка образуется переходный слой толщиной 2–3 мкм с повышенной концентрацией алюминия и пониженной концентрацией кремния (рис. 2).

В оксидной фазе вдоль границы раздела формируется зона протяженностью 2–3 мкм, прилегающая к переходному слою, в которой непрерывно повышается концентрация алюминия, а кремния и кислорода соответственно снижается в направлении от оксидной фазы к алюминию. Концентрация алюминия в этом слое более чем в 5 раз превышает концентрацию кремния и в 1,7 раза – кислорода (табл. 2). Это свидетельствует о том, что переходный слой имеет сложный состав и может содержать оксиды алюминия нестехиометрических составов.

Т а б л и ц а 2. Результаты микрорентгеновского анализа структурных составляющих участков образца (рис. 2) АКС системы Al-10%SiO₂ после нагрева композиции до 700 °С и выдержки в течение 10 мин

Спектр	Состав химических элементов, %							
	O	Na, K	Mg	Al	Si	Ca	Cr	Fe
1	32,66	0,12	0,07	55,76	10,43	0,03	0,86	0,06
2	38,32	0,01	0	27,11	33,69	0,02	0,76	0,09
3	41,21	0,18	0	22,88	34,94	0,05	0,7	0,03
4	13,49	0,13	0	75,52	9,58	0,01	1,27	0
5	41,56	0,04	0	21,91	35,97	0	0,52	0
6	34,16	0,12	0,05	44,16	20,64	0	0,71	0,15
7	12,35	0,20	0	77,01	8,93	0,06	1,34	0,10

В поверхностном слое алюминия, контактирующего с переходным слоем оксидной фазы, в свою очередь, формируется зона протяженностью 5–6 мкм с повышенной концентрацией кремния, при этом концентрация алюминия в нем постепенно уменьшается в направлении от алюминия к поверхности переходного слоя на границе раздела фаз.

В целом концентрации указанных химических элементов при переходе от поверхности алюминия к поверхности оксида кремния через переходный слой изменяются в 3,5–4,0 раза. Это свидетельствует о том, что в процессе нагрева активно происходит диффузия атомов алюминия в поверхностный слой оксида кремния с последующим химическим взаимодействием с образованием свободного кремния, атомы которого переходят в поверхностный слой алюминия. Общая протяженность зоны, в которой наблюдаются процессы физико-химического взаимодействия на границе раздела контактирующих фаз в системе «алюминий – оксид кремния», включая переходный слой на поверхности оксида кремния и зоны с повышенной концентрацией алюминия и кремния на прилегающих к этому слою поверхностях соответственно оксида кремния и алюминия, составляет около 10–12 мкм.

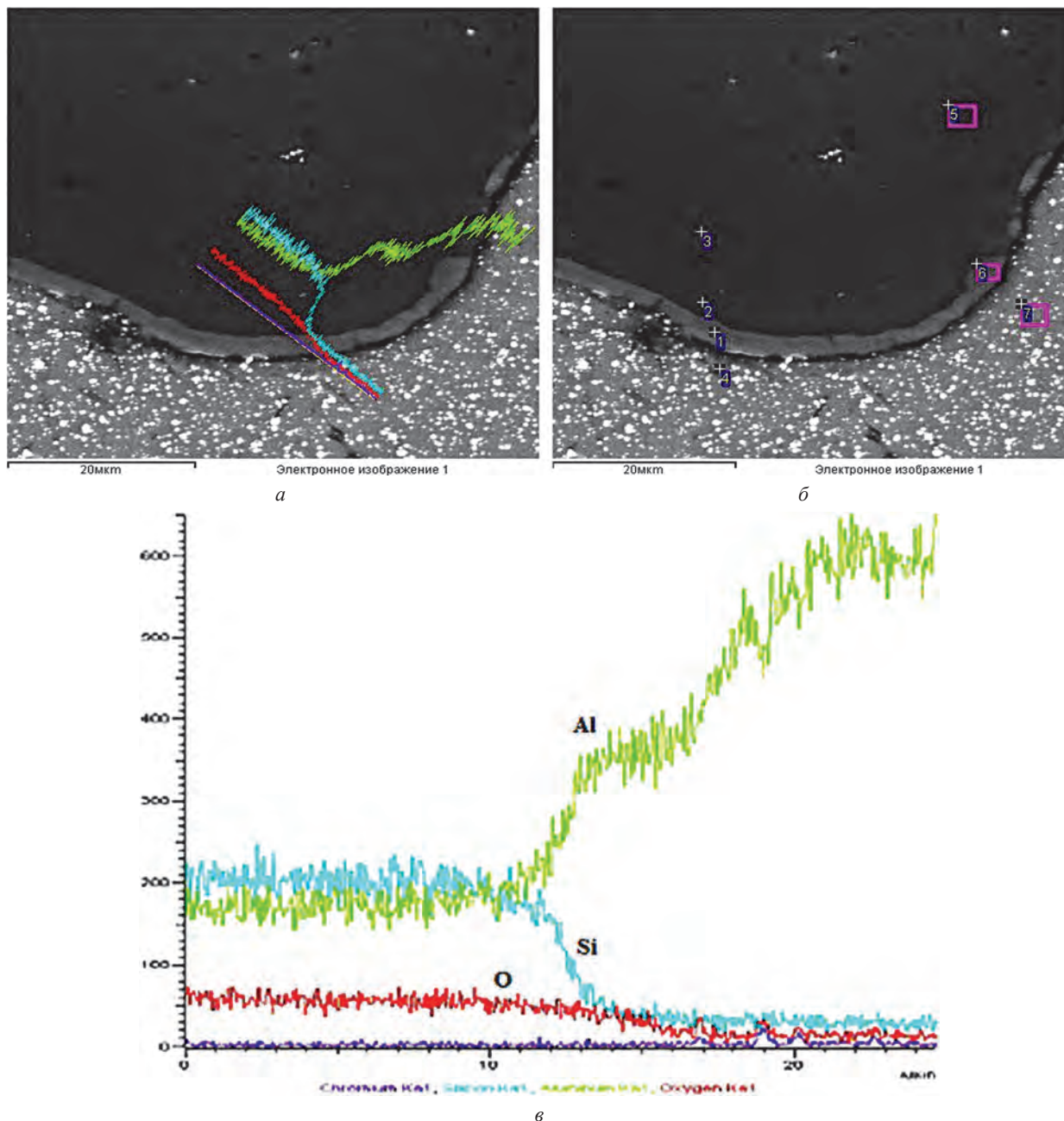


Рис. 2. Электронное изображение микроструктуры (а, б) и спектры рентгенофлуоресцентного излучения (в) АКС Al-10%SiO₂ после нагрева композиции до 700 °С и выдержки в течение 10 мин

После температурно-временной обработки (ТВО) при повышенных температурах (нагрев композиции до 850 °С) и более длительной выдержке (в течение 45 мин) наблюдали восстановление кремния атомами алюминия по всему объему оксидного включения (рис. 3, табл. 3).

Таблица 3. Результаты микрорентгеновского анализа структурных составляющих участков образца (рис. 3) АКС системы Al-10%SiO₂ после нагрева композиции до 850 °С и выдержки в течение 45 мин

Спектр	Состав химических элементов, %							
	O	Na, K	Mg	Al	Si	Ca	Cr	Fe
1	1,61	0,10	0	96,79	1,4	0	0,10	0
2	4,31	0,01	0,05	87,75	6,77	0,04	1,07	0
3	40,9	0	0	58,71	0,31	0,06	0,02	0
4	4,74	0,07	0	68,74	24,2	0	1,51	0,74
5	7,15	0,13	0	70,67	19,15	0	2,47	0,43
6	40,21	0,06	0	58,06	1,58	0	0	0,09
7	3,93	0,02	0,04	93,9	0,70	0,1	1,31	0

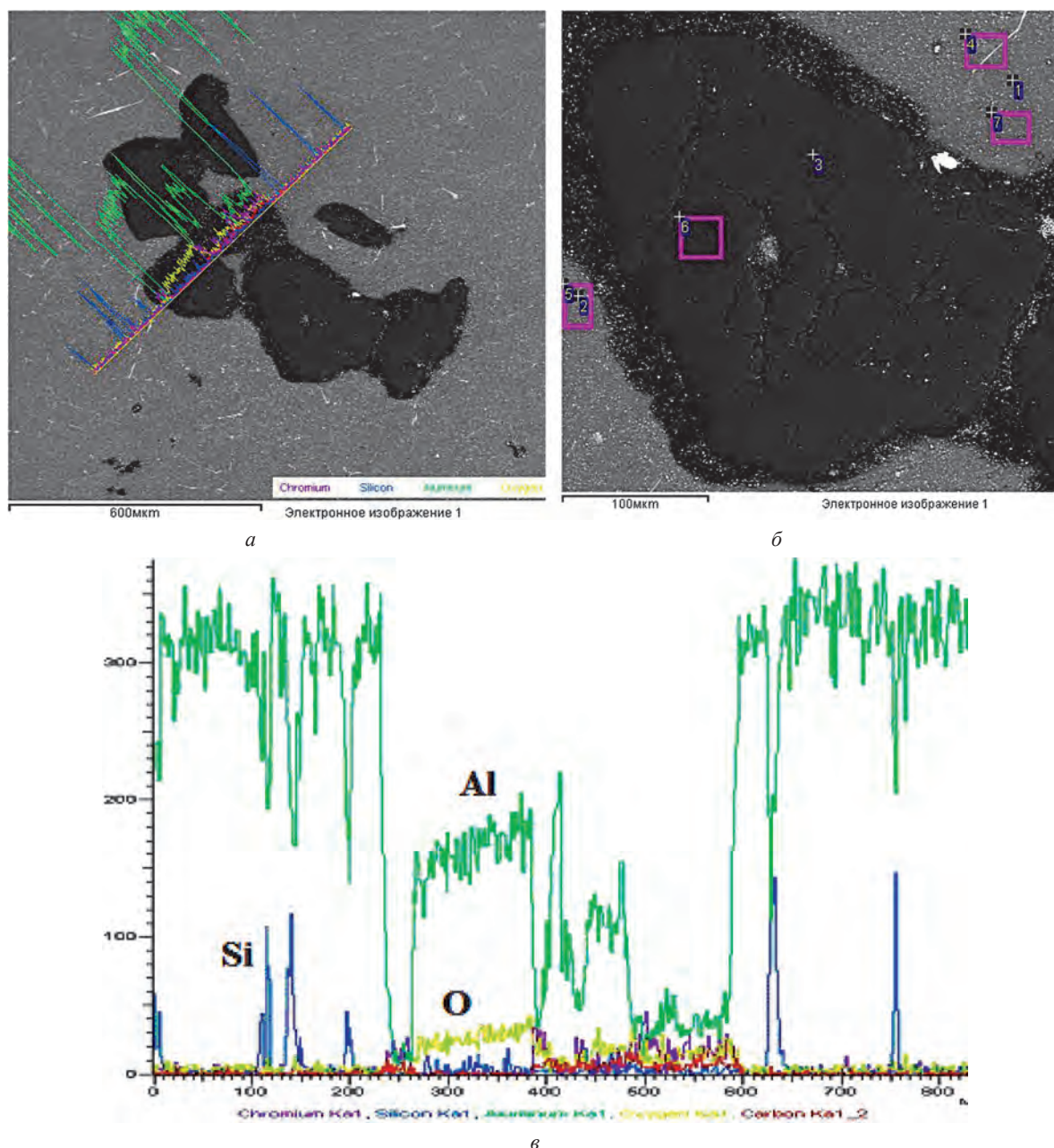


Рис. 3. Электронное изображение микроструктуры (а, б) и спектры рентгенофлуоресцентного излучения (в) АКС Al-10%SiO₂ после нагрева композиции до 850 °С и выдержки в течение 45 мин

Концентрация кремния, по данным микрорентгеновского анализа образцов АКС системы Al-10%SiO₂ после нагрева композиции до 850 °С, выдержки в течение 45 мин с последующим охлаждением до комнатной температуры, снижается по всему объему оксидной фазы до значений 0,3–1,6 мас.%, концентрация алюминия увеличивается до 58–59 мас.%, концентрация кислорода составляет около 40 мас.%, что несколько превышает стехиометрическое соотношение атомов алюминия к кремнию в Al₂O₃.

Следует отметить, что после ТВО АКС в жидком состоянии не отмечалось отделения оксидных фаз от расплава даже при использовании длительного и интенсивного перемешивания композиций (от 1 до 20 кг). Затвердевание АКС системы Al-SiO₂ после ТВО с последующим отбором композиции из тигля осуществлялось в виде однородной вязкой массы. Это свидетельствует о том, что образовавшиеся в АКС в результате реакции восстановления оксида кремния расплавом алюминия оксидные фазы характеризуются хорошей адгезией к расплаву алюминия.

Характер адгезионного взаимодействия алюминия с поверхностью оксидов в АКС, полученных методом ЖТ-совмещения компонентов, оценивали по значению массовой доли сухого шлака, собранного с поверхности расплава, относительно исходной массы неметаллических соединений (наполнителя), вводимой в расплав алюминия. В качестве наполнителя АКС использовали оксид алюминия чистый,

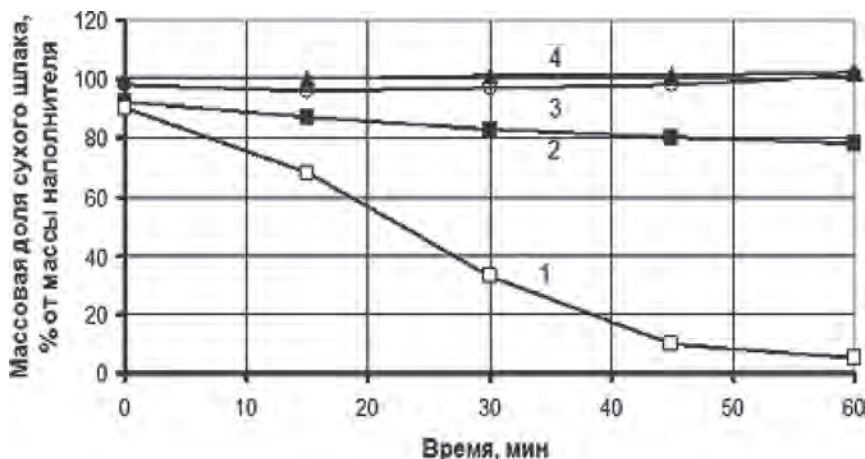


Рис. 4. Влияние времени выдержки алюмоматричных композиций при температуре 800 °С на массовую долю сухого шлака, в процентах от массы наполнителя АКС: 1 – 20 мас.% кварцевого песка после гидрообработки и сушки; 2 – 20 мас.% кварцевого песка в исходном состоянии; 3 – 5 мас.% оксида алюминия; 4 – 20 мас.% кварцевого песка и 0,5 мас.% криолитсодержащего флюса (Na_3AlF_6)

кварцевый песок марки $2\text{K}_2\text{O}_2\text{O}_3$ в исходном состоянии и после гидравлической обработки с последующей сушкой (подготовленный), а также обработанный кварцевый песок с добавками (0,5 мас.%) криолитсодержащего флюса (Na_3AlF_6). Оксидные фазы (20 мас.% для кварцевого песка, 5 мас.% для оксида алюминия) смешивали с расплавом алюминия (массой 100–120 г) в ЖТ состоянии.

Полученные композиции после их затвердевания и повторного нагрева до температуры 800 °С выдерживали различное время (до 1 ч), после чего перемешивали и с поверхности расплава собирали шлак. Собранный шлак после отделения металлических присадок и просева на ситах с размером ячейки 1 мм взвешивали на весах с точностью до 0,1 г. Зависимость массовой доли сухого шлака, в процентах от исходной массы наполнителя АКС, от времени выдержки исследованных композиций при температуре 800 °С представлена на рис. 4.

Анализ полученных результатов показал, что наибольшее адгезионное взаимодействие расплава алюминия с оксидными фазами наблюдается для композиций, полученных с использованием подготовленного кварцевого песка. Для композиций, содержащих оксид алюминия, а также оксид кремния с добавками криолитсодержащего флюса, независимо от времени выдержки композиции после ее перемешивания оксидная фаза отделялась от расплава, всплывая в шлак.

С целью изучения фазового состава оксидных соединений шлака, образующихся в результате взаимодействия алюминия с частицами кремнезема в алюмоматричной композиции, были исследованы продукты реакции – неметаллические фазы, полученные после совмещения компонентов композиции Al–20 мас.% SiO_2 в ЖТ состоянии сплава и его последующей температурно-временной обработки (при температуре 800 °С и выдержке 1 ч), выделенных методом рафинирования из расплава с использованием криолитсодержащего флюса (47% KCl, 30% NaCl, 23% Na_3AlF_6).

Выделенные продукты реакции после промывки водой и сушки подвергали анализу на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3 в пошаговом режиме сканирования в кобальтовом монохроматизированном K_α -излучении в диапазоне углов 2θ 16–120°. Первичную обработку спектра (сглаживание спектра, вычитание фона) проводили с помощью программы DifWin1. Анализ фазового состава по обработанной рентгенограмме выполняли с использованием программы «Crystallographica Search-Match» и базы данных PDF-2 (рис. 5).

Установлено, что фазовый состав соединений, образовавшихся после совмещения компонентов композиции Al–20 мас.% SiO_2 в ЖТ состоянии сплава с последующей ТВО (при температуре 800 °С и выдержке 1 ч) определяется оксидами алюминия со следующими типами кристаллической структуры: ромбоэдрической Al_2O_3 (39,2 мас.%), кубической $\text{Al}_{2,667}\text{O}_4$ (с 54,6 мас.%) и моноклинной $\text{Al}_{2,427}\text{O}_{3,64}$ (6,3 мас.%). Фазы SiO_2 не наблюдалось до уровня чувствительности прибора (порядка 1%).

Полученные результаты свидетельствуют о том, что образующиеся в результате физико-химического взаимодействия между частицами кварцевого песка и алюминия оксидные фазы имеют сложный состав и могут содержать значительное количество оксидов нестехиометрических составов с различной структурой, обеспечивающих хорошую смачиваемость расплавом алюминия оксидных фаз АКС.

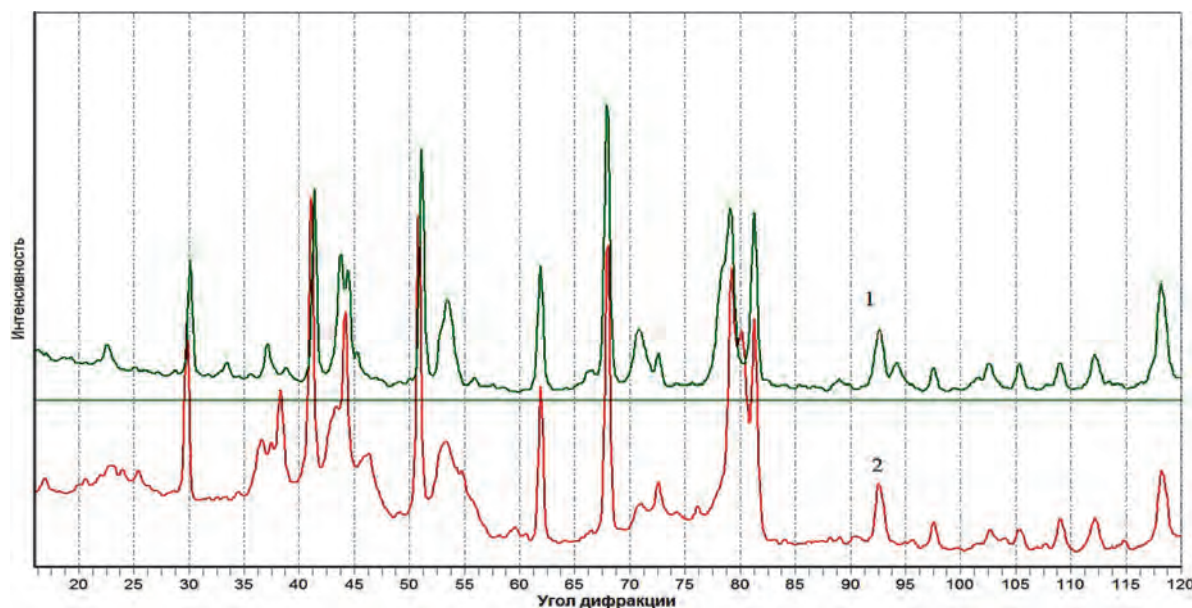


Рис. 5. Рентгенограммы оксидных фаз: 1 – продукты реакции кремнезема с алюминием (после совмещения компонентов композиции Al – 20 мас.% SiO₂ в гетерофазном состоянии сплава и последующей температурно-временной обработки АКС при температуре 800 °С и выдержке 1 ч); 2 – химически чистый оксид алюминия

Анализ полученных результатов позволяет предложить механизм физико-химического взаимодействия компонентов сплава на основе алюминия, содержащего дисперсные соединения оксида кремния, при использовании ТВО композиционной суспензии Al/SiO₂.

На начальном этапе технологического цикла получения композиционной суспензии Al/SiO₂ в алюминии содержатся только частицы оксида кремния (SiO₂ содержит 46,7% Si, остальное – кислород). Реакция с алюминием начинается с формирования контактной поверхности и развивается благодаря диффузии алюминия внутрь оксидного включения. В результате протекания реакции содержание кремния в оксидном включении уменьшается, свободный кремний диффундирует в расплав, а содержание алюминия увеличивается до стехиометрического состава, близкого к Al₂O₃.

При охлаждении композиционной суспензии Al/SiO₂ ниже температуры солидус жидкая фаза претерпевает фазовый переход, сопровождаемый объемными изменениями, в результате которых частицы неметаллического соединения оказываются стесненными металлической фазой сплава, что обеспечивает развитие контактной поверхности между ними.

В соответствии с разработанными технологическими маршрутами получения АКС реакция кремнезема с алюминием протекает в два этапа. Сначала осуществляется низкотемпературная стадия (ниже 700 °С), при которой обеспечиваются условия для формирования на поверхности SiO₂ контактного слоя Al₂O₃. На первом этапе при совмещении компонентов АКС в ЖТ состоянии расплава обеспечивается возникновение физического контакта между гетерофазными структурными составляющими рассматриваемой системы «алюминий/неметаллическая фаза».

Параллельно с развитием контактной поверхности гетерофазных компонентов АКС при ТВО композиции в ЖТ состоянии расплава (температурная обработка АКС путем охлаждения ее ниже температуры солидус с последующим нагревом либо длительная выдержка композиции в ЖТ состоянии металлической основы) в результате диффузии атомов алюминия на поверхности дисперсных частиц наполнителя вначале образуется переходный слой Al₂O₃, с повышенной концентрацией алюминия и пониженной концентрацией Si. В оксидной фазе вдоль границы раздела формируется зона протяженностью 2–3 мкм, прилегающая к переходному слою, в которой непрерывно повышается концентрация атомов алюминия, а атомов кремния и кислорода соответственно снижается в направлении от оксидной фазы к алюминию. В поверхностном слое алюминия, контактирующего с переходным слоем оксидной фазы, в свою очередь, формируется зона протяженностью 5–6 мкм с повышенной концентрацией атомов Si, при этом концентрация атомов алюминия в нем постепенно уменьшается в направлении к поверхности переходного слоя на границе раздела фаз.

Формирование переходного слоя на поверхности дисперсных частиц SiO₂ сопровождается появлением эффекта самопроизвольного смачивания оксидных фаз расплавом алюминия, что позволяет осуще-

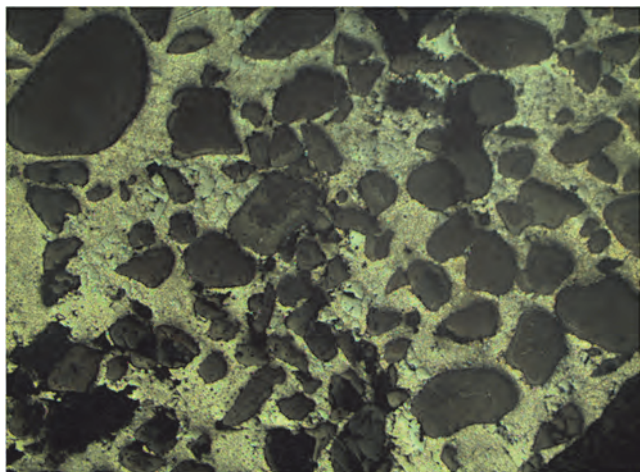


Рис. 6. Структура дисперсно-упрочненного заэвтектического силумина, полученного из композиционной суспензии Al/45% SiO₂, после ТВО в режиме «затверждение–нагрев до 850–880 °С – изотермическая выдержка 60 мин» (без рафинирующей обработки АКС). ×50

обеспечивает получение АКС с содержанием алюмооксидных фаз до 50% (рис. 6).

Нагрев композиции до 800–850 °С позволяет перевести сплав в жидкое состояние, что приводит к интенсификации процессов диффузионного обмена атомов и химического взаимодействия между частицами оксида кремния и алюминием. Повышение температуры металлической основы вызывает увеличение диффузионной подвижности атомов алюминия, что приводит к интенсивному восстановлению SiO₂ во всем объеме дисперсной частицы кварцевого наполнителя с одновременным высвобождением кремния (продукта реакции). Образующаяся кристаллическая структура Al₂O₃ может также содержать некоторое количество остаточного оксида кремния (3–6 мас.%). При этом концентрация кремния в расплаве алюминия непрерывно увеличивается, а ее конечное значение зависит от содержания кварцевого наполнителя в АКС и степени протекания реакции. В результате осуществляется синтез частиц алюмооксидной керамики (Al₂O₃) в расплаве непосредственно в металлургическом цикле обработки композиционной суспензии Al/SiO₂, что концептуально приближает разработанную технологию к методам in-situ.

Выводы

Введение частиц оксидной керамики (SiO₂), осуществляемое низкотратным методом замешивания в ЖТ состоянии, приближает разработанный процесс к жидко-твердофазным методам литья АКС (реолитья, комполитья). Синтезируемые частицы оксидной керамики имеют более сложную структуру, чем обычные включения Al₂O₃, с поверхностными слоями, обеспечивающими их самопроизвольное смачивание расплавом алюминия, и остаточной (в центральной части оксидного включения) фазой SiO₂, что приближает получаемые АКС к полиармированным алюмоматричным композитам. В связи с этим разработанный металлургический процесс синтеза носит характер гибридной, комбинированной технологии получения АКС.

Синтез из кремнезема в расплаве алюминия алюмооксидной керамики с контактным поверхностным слоем, обеспечивающим самопроизвольное смачивание жидким алюминием, открывает перспективы низкотратного производства литейных дисперсно-упрочненных сплавов на основе системы Al-Si/Al₂O₃, так как устраняются основные проблемы, присущие жидкофазным и жидко-твердофазным технологиям их получения: полное усвоение расплавом армирующих частиц Al₂O₃, их однородное распределение в матрице и, как следствие, прочная межфазная связь по границам раздела.

Литература

1. Rohatgi P. K. Metal-matrix Composites / P. K. Rohatgi // Defence Science Journal. 1993. Vol. 43. No. 4. P. 323–349.
2. Yoshinori Nishida. Introduction to Metal Matrix Composites: Fabrication and Recycling / Springer Science & Business Media, 2013. 203 p.
3. Панфилов А. А. Проблемы и перспективы развития производства и применения алюмоматричных композиционных сплавов / А. А. Панфилов, Е. С. Прусов, В. А. Кечин // Сб. тр. Нижегородского гос. техн. ун-та им. П. Е. Алексеева. 2013. № 2 (99). С. 210–217.

ствить дальнейший нагрев композиционной суспензии до более высоких температур (800–850 °С) без отделения оксидных фаз от расплава, даже при использовании длительного и интенсивного перемешивания композиции не происходит сегрегации частиц оксидных фаз. Второй этап реакции кремнезема с алюминием протекает уже в жидком состоянии композиционной суспензии при более высоких температурах (выше 800°С), в зависимости от времени реакции может содержать меньшее или большее количество свободного кремния.

В результате ТВО композиционной суспензии Al/SiO₂ формируется структура сплава, упрочненного алюмооксидными керамическими фазами с различной структурой фаз Al₂O₃ и металлической матрицей Al-Si-сплава. При этом реализация технологического маршрута обработки композиционной суспензии Al/SiO₂, включающего несколько последовательных циклов «ввод кремнезема–ТВО», обе-

4. **Brian Cantor.** Metal and Ceramic Matrix Composites / Brian Cantor, Fionn P. E. Dunne, Ian C. Stone // CRC Press. 2003. 430 p.
5. **Bala G. Narasimha.** A Review on Processing of Particulate Metal Matrix Composites and its Properties / Bala G. Narasimha, Vamsi M. Krishna, Dr. Anthony M. Xavier // International Journal of Applied Engineering Research. 2013. Vol. 8. No. 6. P. 647–666.
6. **Asthana R.** Cast metal-matrix composites. I: Fabrication techniques / R. Asthana // Journal of Materials Synthesis and Processing. 1997. Vol. 5. No. 4. P. 251–278.
7. **Hirt G.** Semi-solid Forming of Aluminium and Steel – Introduction and Overview / G. Hirt, L. Khizhnyakova, R. Baadjou, F. Knauf and R. Kopp // Thixoforming: Semi-solid Metal Processing. Edited by G. Hirt and R. Kopp, 2009, WILEY-VCH, Weinheim. P. 1–27.
8. **Saravanan C.** Fabrication of aluminium metal matrix composite / C. Saravanan, K. Subramanian, D. B. Sivakumar, M. Sathyanandhan, R. Sankara Narayanan // Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences, Special. 2015. Issue 7, P. 82–87.
9. **Рафальский И. В.** Ресурсосберегающий синтез сплавов на основе алюминия с использованием дисперсных неметаллических материалов и интеллектуальные методы контроля металлургических процессов их получения / И. В. Рафальский. Минск: БНТУ, 2016. 308 с.
10. **Рафальский И. В.** Физико-химические основы синтеза силуминов с использованием кварцсодержащих материалов / И. В. Рафальский, А. В. Арабей, Б. М. Немеенок. Минск: БНТУ, 2015. 140 с.

References

1. **Rohatgi P. K.** Metal-matrix Composites. *Defense Science Journal*. 1993, vol. 43, no. 4, pp. 323–349.
2. **Yoshinori Nishida.** Introduction to Metal Matrix Composites: Fabrication and Recycling. *Springer Science & Business Media*, 2013. 203 p.
3. **Panfilov A. A., Prusov E. S., Kechin V. A.** Problemy i perspektivy razvitiya proizvodstva i primeneniya alyumomatrixnykh kompozicionnykh splavov [Problems and prospects of development of production and application of alumo-matrix composite alloys]. *Trudy Nizhegorodskogo gos. techn. universiteta im. R. E. Alekseeva = Proc. of the Nizhny Novgorod State Tech. University of. R. E. Alekseeva*, 2013, no. 2 (99), pp. 210–217.
4. **Brian Cantor, Fionn P. E. Dunne, Ian C. Stone.** Metal and Ceramic Matrix Composites. *CRC Press*, 2003. 430 p.
5. **Bala G. Narasimha, Vamsi M. Krishna, Dr. Sc. Anthony M. Xavier.** A Review on Processing of Particulate Metal Matrix Composites and its Properties. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2013, vol. 8, no. 6. pp. 647–666.
6. **Asthana R.** Cast metal-matrix composites. I: Fabrication techniques. *Journal of Materials Synthesis and Processing*, 1997, vol. 5, no. 4. pp. 251–278.
7. **Hirt G., Khizhnyakova L., Baadjou R., Knauf F. and Kopp R.** Semi-solid Forming of Aluminum and Steel – Introduction and Overview / G. Hirt. *Thixoforming: Semi-solid Metal Processing*. Edited by G. Hirt and R. Kopp, 2009, WILEY-VCH, Weinheim, pp. 1–27.
8. **Saravanan C., Subramanian K., Sivakumar D. B., Sathyanandhan M., Sankara Narayanan R.** Fabrication of aluminum metal matrix composite. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences*, 2015. Special Issue 7, pp. 82–87.
9. **Rafalski I. V.** Resursosberegayuschiy sintez splavov na osnove alyuminiya s ispol'zovaniem dispersnykh nemetallicheskih materialov i intellektual'nye metody kontrolya metallurgicheskikh processov ih polucheniya [Resource-saving synthesis of aluminum alloys using dispersed nonmetallic materials and intelligent methods of controlling metallurgical processes for their production]. Minsk, BNTU Publ., 2016. 308 p.
10. **Rafalski I. V., Arabey A. V., Nemenenok B. M.** Fiziko-himicheskie osnovy sinteza siluminov s ispol'zovaniem kvarcsoderzhaschih materialov [Physicochemical fundamentals of silumin synthesis using quartzose materials]. Minsk, BNTU Publ., 2015. 140 p.