

ВЛИЯНИЕ ОБРАБОТКИ РАСПЛАВА НА ПАРАМЕТРЫ МИКРОСТРУКТУРЫ И ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ СИЛУМИНОВ С РАЗЛИЧНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ КРЕМНИЯ

*М.В. ПОПОВА, доктор техн. наук, профессор
Н.В. КИБКО, соискатель
(СибГИУ, г. Новокузнецк)*

Поступила 12 февраля 2014
Рецензирование 15 апреля 2014
Принята к печати 18 апреля 2014

Попова М.В. – 654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42,
Сибирский государственный индустриальный университет,
e-mail: m.popova@rdtc.ru

Проведено исследование влияния обработки шихты и расплава на параметры микроструктуры и температурный коэффициент линейного расширения доэвтектических, эвтектических и заэвтектических силуминов. Используются следующие способы обработки расплава: наводороживание влажными асбестовыми тампонами, продувка воздухом, продувка водородом, кипячение в щелочном растворе. Дополнительно проведена продувка шихтового кремния воздухом. Установлено, что обработка шихты и расплава по изученным режимам способствует модифицированию структуры, увеличению объемной доли эвтектики и снижению температурного коэффициента линейного расширения силуминов. Обработка расплава приводит к уменьшению размера дендритных ветвей сплавов Al-3 % Si, Al-5 % Si и Al-15 % Si и диспергированию кремния в составе эвтектики силуминов эвтектического и заэвтектического состава. Наиболее эффективное влияние обработки расплава на снижение температурного коэффициента линейного расширения и уменьшение аномалии теплового расширения наблюдается для доэвтектических силуминов с содержанием кремния в количестве 3 и 5 %.

Ключевые слова: силумины, обработка расплава, водород, микроструктура, температурный коэффициент линейного расширения.

Введение

Применение сплавов на основе системы Al-Si в промышленности как конструкционных материалов, а также в виде сплавов специального назначения во многом определяется параметрами их микроструктуры. Кремний, введенный в расплав, уже в количестве 6-7 % склонен к ликвации и образованию первичных выделений кремнистой фазы, как правило, в виде крупных частиц. Поэтому свойства сплавов Al-Si зависят не только от их химического состава, но и от размеров, формы и характера распределения частиц кремнистой фазы.

Для сплавов Al-Si обязательной технологической операцией является модифицирование как метод улучшения структуры и механических

свойств. В настоящее время разработано большое количество способов модифицирования силуминов: использование натрийсодержащих смесей, введение модификаторов в виде солей и лигатур, фосфорсодержащих соединений, кислородсодержащих реагентов, добавок и присадок на основе высокодисперсных компонентов. Одни модификаторы лучше измельчают эвтектический кремний, другие – первичные кристаллы кремнистой фазы. Эффективными модификаторами эвтектики являются поверхностно-активные вещества, прежде всего, натрий, а также литий, калий и кальций, хотя их действие значительно слабее, чем натрия [1]. Однако в более поздних исследованиях показано, что стронций по сравнению с натрием не только обеспечивает повышение прочностных и пластических

свойств доэвтектических силуминов, но и улучшает их жидкотекучесть при большей длительности сохранения эффекта модифицирования [2, 3]. Наиболее эффективным модификатором первичных кристаллов кремния является фосфор, который вводят в расплав либо в чистом виде, либо в виде сплавов, различных соединений и смесей [4–6]. Об измельчении структуры силуминов тугоплавкими частицами соединений переходных металлов, прежде всего, титана и циркония, сообщается во многих работах [7–9]. Разработаны и более сложные комплексные модификаторы на основе системы Al-P-Ti-iC с добавкой Nd [10] и оксида лантана [11], позволяющие существенно улучшить механические свойства заэвтектических силуминов.

Многие исследователи уделяют особое внимание влиянию газов на процесс модифицирования сплавов Al-Si. В работах [12, 13] показано, что эффективным модификатором силуминов, оказывающим положительное влияние на их микроструктуру и свойства, является водород. Установлено [14–16], что обработка расплава силуминов водородом не только модифицирует их структуру, улучшая механические свойства, но и влияет на их тепловое расширение. Таким образом, величина температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР, α) силуминов, так же как и механические свойства, во многом определяется параметрами их микроструктуры. Весьма важно, что положительный эффект обработки зависит от правильного выбора способа введения водорода в расплав, а также от длительности и температуры наводороживания. Однако вопрос о влиянии режимов и способов наводороживания на количественные параметры микроструктуры силуминов и их ТКЛР остается слабо изученным.

В настоящей работе исследовано влияние различных способов и режимов обработки расплава, предусматривающей наводороживание, на параметры микроструктуры и температурный коэффициент линейного расширения силуминов с содержанием кремния 3...15 %.

Материалы и методика экспериментальных исследований

В качестве объекта исследования были выбраны двойные сплавы Al-(3...15) % Si. В расплавы алюминия вводили кристаллический крем-

ний в количестве 3, 5, 7, 11 и 15 %. Затем расплав подвергали наводороживанию влажными асбестовыми тампонами. Дополнительно использовали следующие виды обработки: продувка расплава Al-5 % Si подогретым или горячим воздухом при температуре 900 °С в течение 30 мин или кипячение его в щелочном растворе (KOH); для сплава Al-11 % Si – продувка шихтового кремния воздухом при температуре 1100 °С в течение 30 мин. Для сплава Al-15 % Si продувку расплава водородом, получаемым при взаимодействии алюминия и щелочи NaOH, проводили по четырем режимам: при температуре 860 °С в течение 1 и 5 мин и при температуре 900 °С в течение 10 и 20 мин. Сплавы заливали в холодный металлический кокиль. Из полученных слитков вырезали образцы для металлографического и дилатометрического анализа.

Металлографические исследования проводили с помощью оптического микроскопа OLYMPUS GX51 с программным обеспечением компании СИАМС в диапазоне увеличений 100–1000 и микроскопа Carl Zeiss EVO50 XVP с микроанализатором EDS X-Act при ускоряющем напряжении 20 кВ. Температурный коэффициент линейного расширения определяли с помощью фоторегистрирующего оптического дилатометра системы Шевенара. Содержание атомарного водорода определяли на лабораторной установке В-1 методом нагрева образца в токе инертного газа-носителя (аргона).

Результаты исследования и их обсуждение

На первом этапе изучено влияние обработки расплава влажными асбестовыми тампонами на содержание водорода и параметры микроструктуры силуминов с содержанием кремния от 3 до 15 %. В результате обработки расплава указанным способом наблюдается увеличение содержания водорода, находящегося в твердом растворе (табл. 1), что оказывает модифицирующее влияние на микроструктуру силуминов. Влияние наводороживания на морфологию и размеры структурных составляющих оценивали по результатам металлографического анализа исследованных сплавов.

Количественный металлографический анализ наводороженных малокремнистых силуминов Al-3 % Si и Al-5 % Si показал, что обработка

Влияние обработки расплава влажными асбестовыми тампонами на содержание водорода и размер структурных составляющих силуминов с 3–15 % кремния

Сплав	Способ приготовления	Размер структурных составляющих, мкм				Содержание водорода [H], см ³ /100 г Ме
		Первичные кристаллы кремнистой фазы	Дендриты твердого раствора	Эвтектический кремний		
				округлой формы	игольчатой формы	
Al-3 % Si	Обычный	–	62...415	0,5...2,4	–	1,2
	Обработка расплава	–	91...257	0,4...3,8	–	1,7
Al-5 % Si	Обычный	–	120...1433	0,5...2,8	–	1,3
	Обработка расплава	–	115...304	1,8...18,4	–	1,9
Al-7 % Si	Обычный	–	77...549	0,5...4,0	–	1,3
	Обработка расплава	–	186...1240	0,3...3,1	–	2,6
Al-11 % Si	Обычный	–	183...1592	1,6...4,2	12,3...75,0	1,4
	Обработка расплава	8,7...22,3	216...1957	1,7...4,3	18...61	2,1
Al-15 % Si	Обычный	12...170	133...441	0,2...1,9	34...87	1,6
	Обработка расплава	79...190	214...315	0,4...2,3	12,3...57,9	2,4

расплава приводит к диспергированию дендритов α -твердого раствора и увеличению размеров эвтектического кремния. Обработка расплава Al-7 % Si, напротив, способствует увеличению размеров дендритов α -твердого раствора (рис. 1, б, г, е и табл. 1). Возможно, это связано с тем, что в отличие от сплавов Al-3 % Si и Al-5 % Si наводороживание сплава Al-7 % Si по изученному режиму резко увеличило содержание водорода в нем по сравнению с исходным уровнем (см. табл. 1), что привело к так называемому эффекту перемодифицирования [1].

Установлено, что наводороживание усиливает неравновесность структуры, которая обусловлена кристаллизацией в металлический кокиль. Наиболее ярко это проявляется для сплавов Al-7 % Si и Al-11 % Si. После обработки расплава у силумина с 7 % кремния наблюдается отклонение от нормальной структуры, проявляющееся в увеличении объемной доли эвтектики, присутствии внутри дендритов α -твердого раствора игл кремния и скелетообразных кристаллов железосодержащей фазы (рис. 1, е).

Наводороживание сплава Al-11 % Si способствует росту дендритов α -твердого раствора и диспергированию эвтектического кремния иголь-

чатой формы (см. табл. 1). Кроме того, в структуре в небольшом количестве появляются мелкие первичные кристаллы кремнистой фазы, а также расширяется область с мелкодисперсным строением эвтектики в центре образца (рис. 2, б).

Обработка расплава влажными асбестовыми тампонами способствует росту кристаллов кремнистой фазы в структуре заэвтектического сплава Al-15 % Si, наблюдающихся в местах скопления дендритов α -твердого раствора, диспергированию дендритов α -твердого раствора и эвтектического кремния игольчатой формы (рис. 2, г и табл. 1).

Как видно из приведенных данных, модифицирующее действие водорода проявляется по-разному в зависимости от содержания кремния: в структуре доэвтектических силуминов происходит диспергирование дендритов α -твердого раствора, в эвтектических и заэвтектических силуминах диспергируется в первую очередь кремний, входящий в состав эвтектики, а также увеличивается объемная доля эвтектики.

Ранее [14] нами было установлено, что такие технологические факторы, как обработка шихты и расплава, могут способствовать снижению ТКЛР силуминов. В связи с этим на следующем

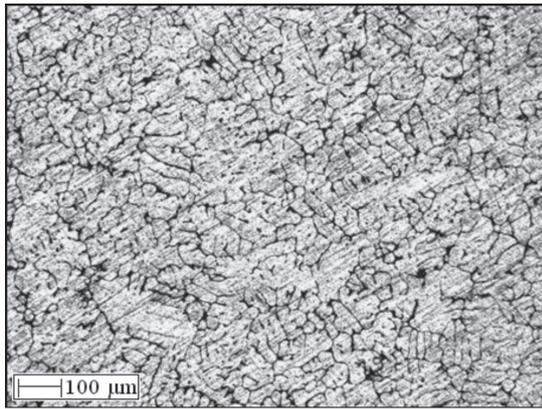
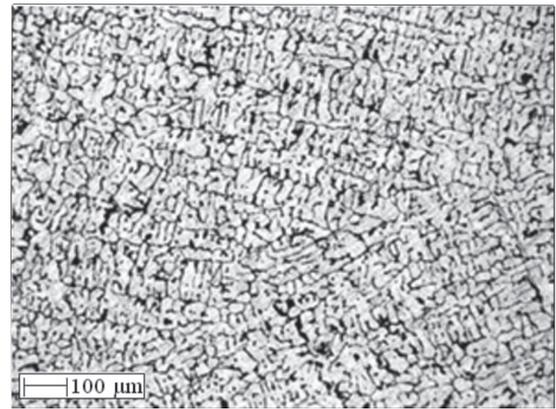
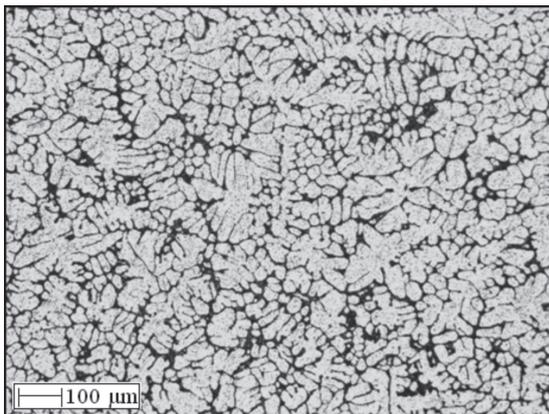
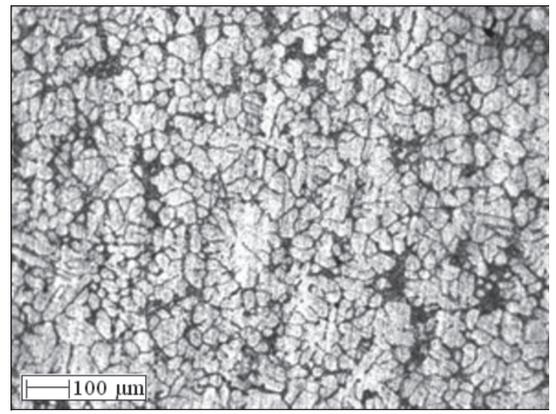
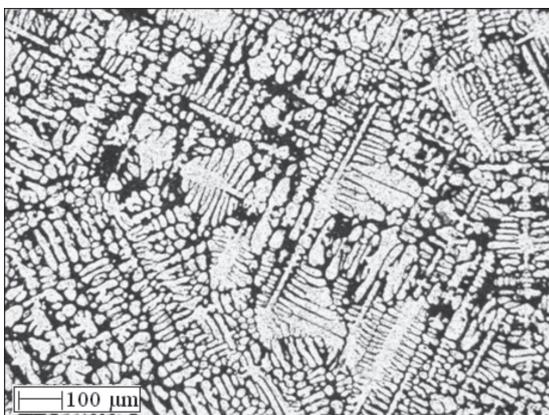
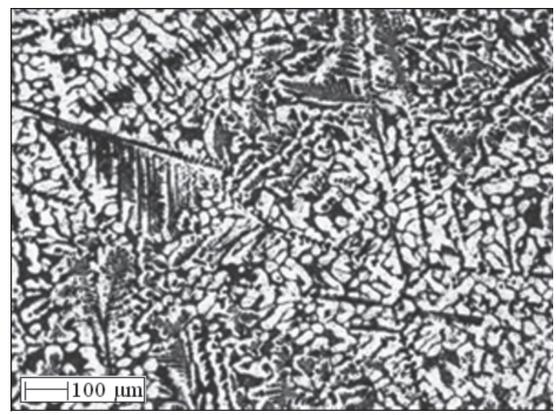

a

б

в

г

д

е

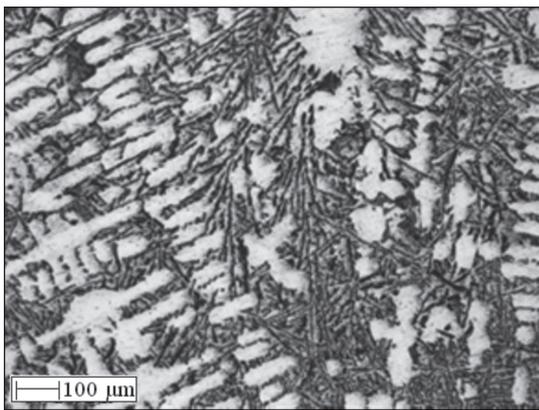
Рис. 1. Влияние обработки расплава влажными асбестовыми тампонами на микроструктуру сплавов с 5–7 % кремния:

a, б – 3 % Si; *в, г* – 5 % Si; *д, е* – 7 % Si; *a, в, д* – исходный; *б, г, е* – после обработки расплава

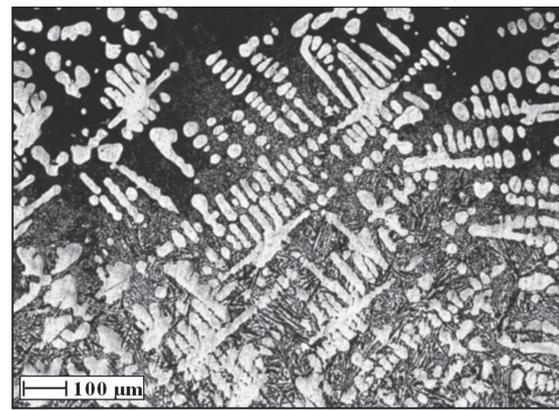
этапе было исследовано влияние обработки шихты и расплава, предусматривающее увеличение содержания атомарного водорода на температурный коэффициент линейного расширения сплавов с 3–15 % кремния.

Результаты определения температурного коэффициента линейного расширения приведены в табл. 2. Из табличных данных следует, что наводороживание расплава Al-3 % Si влажными

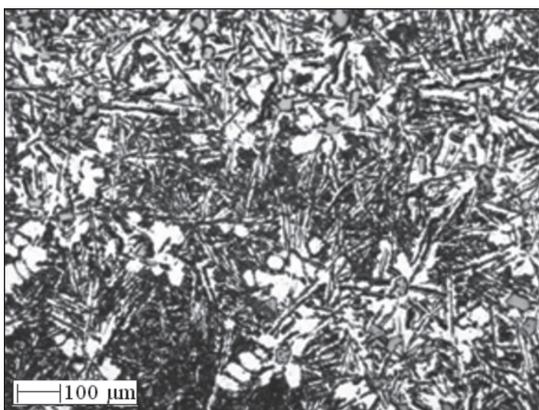
асбестовыми тампонами и продувка расплава Al-5 % Si подогретым или горячим воздухом в течение 30 мин при температуре 900 °C или кипячение его в щелочном растворе (KOH) способствуют уменьшению аномалии теплового расширения, наблюдающейся в интервале температур испытания 250...350 °C, и снижению значений температурного коэффициента линейного расширения.



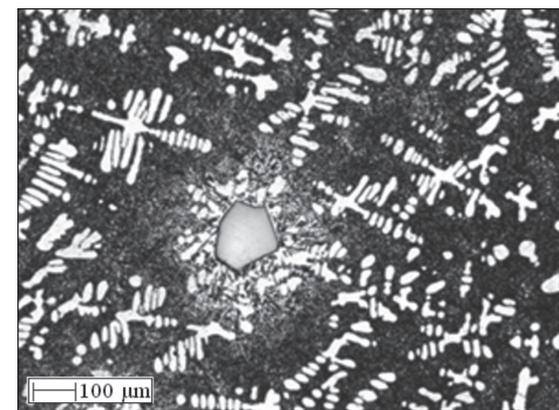
а



б



в



г

Рис. 2. Влияние обработки расплава влажными асбестовыми тампонами на микроструктуру силуминов с содержанием 11 и 15 % Si:

а, б – 11 % Si, в, г – 15 % Si; а, в – исходный; б, г – после обработки расплава

Обработка расплава Al-7 % Si влажными асбестовыми тампонами увеличивает значения ТКЛР при 100...400 °С. Аномальное повышение температурного коэффициента линейного расширения (на 34 %) наблюдается при 250...300 °С. Возникновение аномалии теплового расширения коррелирует со структурными изменениями, которые наблюдаются после обработки расплава.

Продувка шихтового кремния воздухом и обработка расплава влажными асбестовыми тампонами практически не оказывают влияния на ТКЛР силуминов эвтектического и заэвтектического состава.

Полученные результаты позволяют утверждать, что улучшение характеристик микроструктуры и повышение свойств силуминов в значительной степени зависят от правильного выбора способа и режима наводороживания. Поэтому на следующем этапе данной работы было изучено влияние продувки расплава Al-15 % Si водородом,

получаемым при взаимодействии алюминия и щелочи NaOH, в течение различного времени на параметры микроструктуры и температурный коэффициент линейного расширения. Продувку проводили по четырем режимам: при температуре 860 °С в течение 1 и 5 мин и при температуре 900 °С в течение 10 и 20 мин.

Металлографический анализ (при увеличении $\times 1000$) показал, что наводороживание указанным способом, в отличие от обработки расплава влажными асбестовыми тампонами, приводит к образованию мелкодисперсной структуры, характеризующейся тем, что эвтектика имеет тонкое строение и наблюдается измельчение выделений первичных кристаллов кремнистой фазы (табл. 3 и рис. 3).

Результаты количественного металлографического анализа показывают, что наибольший эффект модифицирования микроструктуры проявляется после продувки расплава Al-15 % Si водородом, получаемым при взаимодействии

Таблица 2

Влияние обработки расплава на температурный коэффициент линейного расширения силуминов с 3–15 % кремния

Сплав	Способ приготовления	Температурный коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^6$, град ⁻¹ при температуре испытания, °С							
		50	100	150	200	250	300	350	400
Al-3 % Si	Обычный	20,6	21,4	21,8	22,5	24,7	31,7	27,1	23,7
	Обработка расплава асбестовыми тампонами	18,9	21,0	22,0	22,8	24,6	31,0	24,1	18,2
Al-5 % Si	Обычный	18,9	21,4	22,8	24,4	28,7	38,1	24,7	23,3
	Обработка расплава подогретым воздухом	19,7	21,3	21,8	21,0	23,5	26,1	29,6	26,0
	Обработка расплава горячим воздухом	19,0	20,5	21,8	22,6	23,2	26,6	30,5	27
	Кипячение в щелочном растворе (КОН)	20,0	21,7	22,2	24,3	28,6	25,9	23,2	22,0
Al-7 % Si	Обычный	22,1	19,8	19,1	19,4	20,8	23,2	21,2	17,6
	Обработка расплава асбестовыми тампонами	19,5	21,9	22,0	22,9	27,2	31,7	23,1	19,5
Al-11 % Si	Обычный	18,3	18,8	19,7	20,3	22,1	23,9	24,4	22,8
	Продувка шихтового кремния воздухом	17,8	19,4	20,0	21,0	21,5	23,9	26,5	22,4
Al-15 % Si	Обычный	18,0	18,4	18,5	18,8	19,0	19,3	19,7	18,5
	Обработка расплава асбестовыми тампонами	17,1	18,0	18,2	18,8	19,0	20,2	20,5	20,9

Таблица 3

Влияние времени продувки расплава водородом на размер структурных составляющих сплава Al-15 % Si

Время продувки, мин	Размер структурных составляющих, мкм			
	Первичные кристаллы кремнистой фазы	Дендриты твердого раствора	Эвтектический кремний	
			округлой формы	игольчатой формы
–	12...170	133...441	0,2...1,9	34...87
1	20...100	100...652	5,4...8,2	–
5	10...135	300...600	0,9...3,2	6,0...14
10	26...150	–	0,9...5,5	–
20	20...190	184...500	1,0...5,5	–

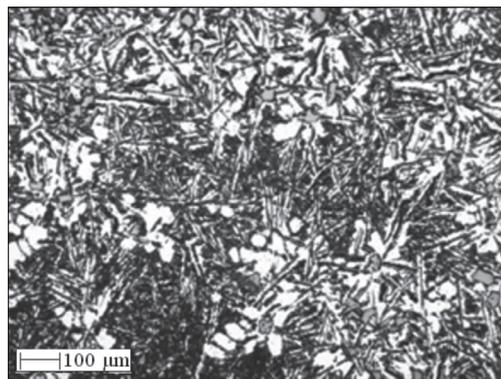
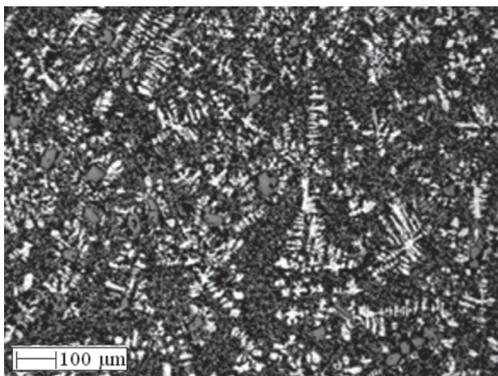
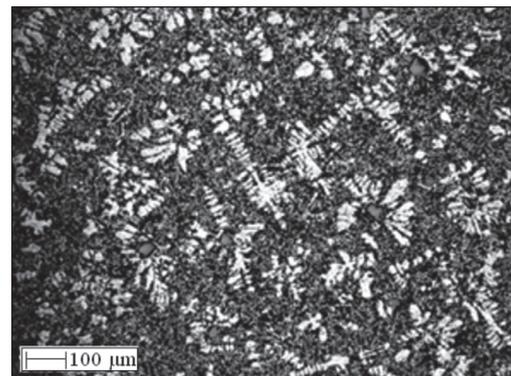
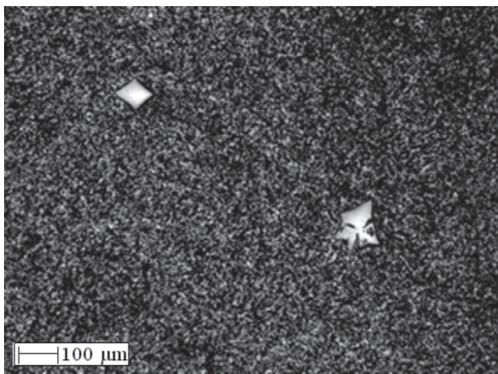
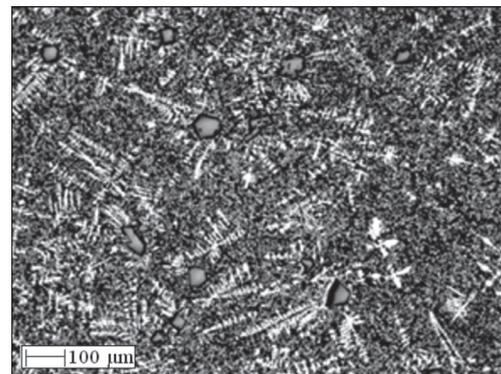
*a**б**в**г**д*

Рис. 3. Влияние времени наводороживания на микроструктуру сплава Al-15 % Si:

a – исходный; *б* – 1 мин; *в* – 5 мин; *г* – 10 мин; *д* – 20 мин

алюминия и щелочи NaOH, в течение 10 мин (табл. 3 и рис. 3, *г*). После обработки расплава по данному режиму наблюдается увеличение объемной доли эвтектической составляющей, и структура сплава состоит только из мелкодисперсной эвтектики и первичных кристаллов кремнистой фазы, присутствующих в небольшом количестве.

С помощью растровой электронной микроскопии установлено, что после этого режима наводороживания наблюдается более равномерное распределение кремния по объему сплава по сравнению с остальными способами обработки расплава.

Продувка расплава Al-15 % Si водородом в течение 10 и 20 мин в наибольшей степени положительно влияет не только на параметры микроструктуры, но и на тепловое расширение силумина. Установлено, что предварительное наводороживание в течение 10 и 20 мин снижает ТКЛР сплава Al-15 % Si при температурах испытания 50...150 °C в среднем с $18 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹ до $16,5 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹ (рис. 4).

Наименьшее значение температурного коэффициента линейного расширения соответствует температуре испытания 50 °C ($\alpha_{50} = 15,7 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹).

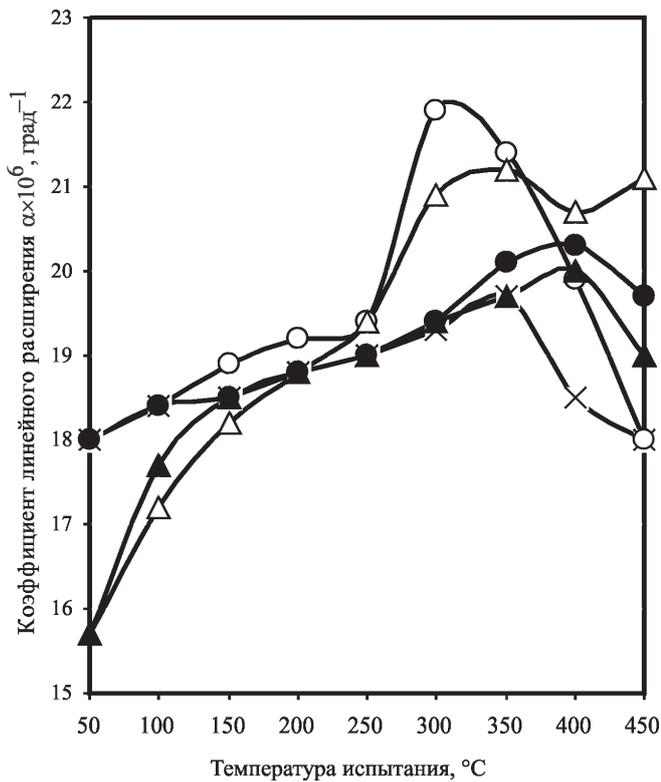


Рис. 4. Влияние времени продувки расплава водородом на температурный коэффициент линейного расширения сплава Al-15%Si:

x - x - исходный; o - o - 1 мин; • - • - 5 мин; Δ - Δ - 10 мин; ▲ - ▲ - 20 мин

Выводы

Обработка расплава силуминов с содержанием кремния 3...15 %, предусматривающая увеличение содержания в них атомарного водорода, оказывает модифицирующее влияние на их микроструктуру.

Модифицирующее действие водорода зависит от содержания кремния в сплаве. В случае оптимально выбранного режима наводороживания происходит не только измельчение структурных составляющих и улучшение их морфологии, но и уменьшение температурного коэффициента линейного расширения силуминов. Для сплавов Al-3...5 % Si увеличение содержания водорода в сплаве приводит к уменьшению аномалии теплового расширения в интервале 250...300 °C, характерной для малокремнистых силуминов. Продувка расплава водородом позволяет снизить ТКЛР заэвтектического сплава Al-15 % Si в интервале температур испытания 50...150 °C в среднем с $18 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹ до $16,5 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹.

Список литературы

1. Струганов Г.Б. Сплавы алюминия с кремнием / Г.Б. Струганов, В.А. Ротенберг, Г.Б. Гершман. – М.: Металлургия, 1977. – 271 с.
2. Crubes U.G. Veredelung von Aluminiumgublerung mit Al-Sr 3,5- Vorlegierung in Drahtform // U.G. Crubes. – Giesserei. – 1983. – 70. – № 8. – S. 257–258.
3. Абрамов А.А. О модифицировании силуминов / А.А. Абрамов // Литейное производство. – 2012. – № 7. – С. 17–19.
4. Королев С.П. Проблемы и практика модифицирования заэвтектических силуминов для поршневого сплава / С.П. Королев, В.М. Михайловский, Б.М. Немененок [и др.] // Литейщик России. – 2005. – № 10. – С. 19–22.
5. Афанасьев В.К. Использование водорода и фосфора для производства поршневых силуминов / В.К. Афанасьев В.К., А.Н. Прудников, М.В. Попова [и др.] // Водородное материаловедение и химия углеродных наноматериалов: материалы IX международной. науч. конф. ICHMS-2005.–Севастополь. – 2005. – С. 225–227.
6. Прудников А.Н. Совершенствование термической обработки поршневых деформируемых силуминов с добавками фосфора и водорода // Обработка металлов. – 2009. – № 1 (Вып. 42). – С. 8–11.
7. Стеценко В.Ю. О модифицировании доэвтектических и эвтектических силуминов / Стеценко В.Ю. // Литье и металлургия. – 2008. – №1. – С. 149–150.
8. Григорьев В.М. Влияние циркониевой лигатуры на структуру и свойства алюминия / В.М. Григорьев, Т.В. Белоус // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке: труды V международной науч. конф. – Хабаровск, ДВГУПС, 2007. – С. 104–107.
9. Лущик П.Е. Влияние дисперсных добавок карбидов на морфологию кремния в силуминах / П.Е. Лущик, И.В. Рафальский // Ползуновский альманах. – 2011. – №4. – С. 120–121.
10. Xu C.L., Jiang Q.C., Yang Y.F., Wang H.Y., Wang J.G. Effect of Nd on primary silicon and eutectic silicon in hypereutectic Al-Si alloy. Journal of Alloys and Compounds, 2006, Vol. 422, Issues 1–2, pp. L1–L4.
11. Xu C.L. Effect of La₂O₃ in the Al-P-Ti-TiC-La₂O₃ modifier on primary silicon in hypereutectic Al-Si alloy / C.L. Xu, H.Y. Wang, Y.F. Yang // J. Alloys and Compounds. – 2006. 421. – № 1. – P. 128–132.
12. Борисов Г.П. О роли водорода в формировании структуры и свойств алюминиевых сплавов / Г.П. Борисов // Металлургия машиностроения. – 2005. – № 5. – С. 11–20.
13. Стеценко В.Ю. О механизме модифицирования силуминов / В.Ю. Стеценко // Металлургия машиностроения. – 2008. – № 1. – С. 20–23.

14. *Афанасьев В.К.* Легкие сплавы с малым тепловым расширением / В.К. Афанасьев, М.В. Попова, А.А. Ружило [и др.]. – Кемерово: Кузбассвуиздат, 2000. – 376 с.

15. *Попова М.В.* Наследственное влияние обработки шихты и расплава на терморасширение заэвтектических силуминов / М.В. Попова, А.А. Ружило // *Литейное производство*. – 2000. – № 10. – С. 4–6.

16. *Афанасьев В.К.* Влияние обработки расплава водяным паром и термической обработки на линейное расширение алюминия с добавками 3 – 9% кремния / В.К. Афанасьев [и др.] // *Вестник Российской академии естественных наук. Западно-Сибирское отделение*. – 2009. – Вып. 11. – С. 105–110.

OBRAVOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 2(63), April – June 2014, Pages 107–116

Influence of fusion treatment on parameters of a microstructure and thermal expansion of silumin with the various content of silicon

Popova M.V., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: m.popova@rdtc.ru

Kibko N.V., Applicant

Siberian State Industrial University, 42 Kirov st., Novokuznetsk, 654007, Russian Federation

Abstract

Study of influence of fusion mixture and fusion treatment on the parameters of microstructure and temperature coefficient of linear expansion of hypoeutectic, eutectic and hypereutectoid silumin is conducted. The next ways of a fusion treatment are used: hydrogen charging by the wet fiber rock sponge, air purge, hydrogen purge, boiling in alkali solution. There was an additional air purge of silicon fusion mixture. It is established that fusion mixture and fusion treatment using studied regimes promotes structure modifying, increases volume fraction of eutectic and decreases the temperature coefficient of linear expansion of silumins. Fusion treatment leads to decrease of dendritic branches size of Al - 3 % Si, Al – 5 % Si и Al – 15 % Si alloys and to the silicium dispersion in the content of silumins eutectic of eutectic and hypereutectoid content. The most effective influence of fusion treatment oriented to decrease of the temperature coefficient of linear expansion and decrease of abnormal thermal expansion is observed for hypoeutectic silumins with carbon content of 3 and 5 %.

Keywords:

silumin, fusion treatment, hydrogen, microstructure, temperature coefficient of linear expansion.

References

1. Stroganov G.B., Rotenberg V.A., Gershman G.B. *Splavy aliuminiia s kremniem* [Alloys of aluminum with silicon]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1977. 271 p.
2. Crubes U.G. Veredelung von Aluminiumgublegierung mit Al-Sr 3,5- Vorlegierung in Drahtform. *Giesserei*, 1983. Vol. 70, no. 8, pp. 257–258.
3. Abramov A.A. O modifitsirovanii siluminov [On the Inoculation of Silumins]. *Litejnoe Proizvodstvo – Foundry. Technologies and Equipment*, 2012, no. 7, pp. 17–19.
4. Korolev S.P., Mikhailovskii V.M., Nemenenok B.M. et al. Problemy i praktika modifitsirovaniia zaevtekteskikh siluminov dlia porshnevogo splava [Problems and practice of modifying hypereutectic silumins for piston alloy]. *Liteishchik Rossii – Caster Russia*, 2005, no. 10, pp. 19–22.
5. Afanas'ev V.K., Prudnikov A.N., Popova M.V. Ispol'zovanie vodoroda i fosfora dlia proizvodstva porshnevnykh siluminov [The use of hydrogen for the production of phosphorus piston silumin]. *Materialy IX mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii "Vodorodnoe materialovedenie i khimiia uglerodnykh nanomaterialov" ICHMS-2005* [Proceedings of the IX International Scientific Conference "Hydrogen Materials Science and Chemistry of Carbon Nanomaterials" ICHMS-2005]. Sevastopol, 2005, pp. 225–227.

6. Prudnikov A.N. Sovershenstvovanie termicheskoi obrabotki porshnevnykh deformiruemykh siluminov s dobavkami fosfora i vodoroda [Perfection of Thermal Processing Piston Deformable Silumins with Additives of Phosphorus and Hydrogen]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) - Metal Working and Material Science*, 2009, no. 1 (42), pp. 8–11.
7. Stetsenko V.Yu. O modifitsirovaniy doevtekticheskikh i evtekticheskikh siluminov [About modification of hypoeutectic and eutectic silumins]. *Lit'e i metallurgiya - Foundry and metallurgy*, 2008, no. 1, pp. 149–150.
8. Grigor'ev V.M., Belous T.V. Vliianie tsirkonievoi ligatury na strukturu i svoystva aliuminiia [Influence of zirconium addition alloy on structure and properties of aluminum]. *Trudy V mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii "Nauchno-tekhnicheskoe i ekonomicheskoe sotrudnichestvo stran ATR v XXI veke"* [Proceedings of the Fifth International nauchnoy konferentsii "Scientific-Technical and Economic Cooperation Asia-Pacific countries in the XXI Century"]. Khabarovsk, FESTU, 2007, pp. 104–107.
9. Lushchik P.E., Rafal'skii I.V. Vliianie dispersnykh dobavok karbidov na morfologiyu kremniia v siluminakh [Influence of additives dispersed carbides on the morphology of silicon silumins]. *Polzunovskii al'manakh - Polzunov Almanac*, 2011, no. 4, pp. 120–121.
10. Xu C.L., Jiang Q.C., Yang Y.F., Wang H.Y., Wang J.G. Effect of Nd on primary silicon and eutectic silicon in hypereutectic Al-Si alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2006, Vol. 422, Issues 1–2, pp. L1–L4.
11. Xu C.L., Wang H.Y., Yang Y.F., Wang Hong-Ying, Jiang Q.C. Effect of La_2O_3 in the Al-P-Ti-TiC- La_2O_3 modifier on primary silicon in hypereutectic Al-Si alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2006, Vol. 421, no. 1, pp. 128–132.
12. Borisov G.P. O roli vodoroda v formirovaniy struktury i svoystv aliuminievykh splavov [About the Role of Hydrogen in the Formation of Structure and Properties of Aluminum Alloys]. *Metallurgia Mashinostroyeniya - Metallurgy of Machinery Building*, 2005, no. 5, pp. 11–20.
13. Stetsenko V.Yu. O mekhanizme modifitsirovaniia siluminov [Inoculation Mechanisms for Silumins]. *Metallurgia Mashinostroyeniya - Metallurgy of Machinery Building*, 2008, no. 1, pp. 20–23.
14. Afanas'ev V.K., Popova M.V., Ruzhilo A.A., Frolov V.F. *Legkie splavy s malym teplovym rasshireniem* [Light alloys with low thermal expansion]. Kemerovo, Kuzbassvuzizdat, 2000. 376 p.
15. Popova M.V., Ruzhilo A.A. Nasledstvennoe vliianie obrabotki shikhty i rasplava na termorasshirenie zavtekticheskikh siluminov [Hereditary influence batch processing and melt thermal expansion hypereutectic silumins]. *Litejnoe Proizvodstvo - Foundry. Technologies and Equipment*, 2000, no. 10, pp. 4–6.
16. Afanas'ev V.K. Vliianie obrabotki rasplava vodianym parom i termicheskoi obrabotki na lineinoe rasshirenie aliuminiia s dobavkami 3–9 % kremniia [Effect of melt processing steam and heat treatment on the linear expansion of aluminum with additions of 3–9 % silicon]. *Vestnik Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Zapadno-Sibirskoe otdelenie. - Herald of the Russian Academy of Natural Sciences*, 2009, Issue 11, pp. 105–110.

Received 12 February 2014

Revised 15 April 2014

Accepted 18 April 2014