



УДК 669.094.25:669.715

Поступила 08.06.2015

НОВЫЙ СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ СПЛАВОВ АЛЮМИНИЯ С КРЕМНИЕМ NEW METHOD OF PRODUCTION OF ALUMINUM – SILICON ALLOYS

*В. К. АФАНАСЬЕВ, Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия,
Е. И. МАРУКОВИЧ, Институт технологии металлов НАН Беларуси, г. Могилев, Беларусь,
М. Н. ЧУРИК, Институт порошковой металлургии НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь,
В. В. ГЕРЦЕН, А. В. ГОРШЕНИН, Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, Россия, А. А. САМОНЬ, ОАО «Информационные спутниковые системы
им. акад. М. Ф. Решетнева», Россия*

*V. K. AFANASIEV, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia,
E. I. MARUKOVICH, Institute of Technology of Metals of National Academy of Sciences of Belarus, Mogilev, Belarus,
M. N. CHURIK, Powder Metallurgy Institute of National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus,
V. V. GERTSEN, A. V. GORSHENIN, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia,
A. A. SAMON, OJSC «Information Satellite Systems named after acad. M. Reshetnev, Russia*

Разработан новый подход к приготовлению алюминиево-кремниевых сплавов, базирующийся на представлении о ведущей роли водорода в формировании структуры и свойств сплавов и заключающийся в использовании в качестве шихтовых материалов диоксида кремния (кремнезема) и водорода взамен кристаллического кремния. Предложены первоначальные практические пути реализации нового способа на примере промышленных сплавов, приготовленных на шихтовом синтетическом сплаве. Показано, что применение предложенного способа позволяет повысить механические свойства и снизить коэффициент линейного расширения сплавов Al-Si. Изучено влияние термической обработки на механические свойства, плотность и тепловое расширение синтетических сплавов.

A new approach to the preparation of aluminum-silicon alloys, based on the concept of the leading role of hydrogen in determining the structure and properties of alloys consists in using as charge materials of silicon dioxide (silica) and hydrogen instead of crystalline silicon was described. Practical ways to implement the new method were proposed on the example of industrial alloys prepared on charge synthetic alloy. It is shown that the application of the proposed method allows to improve the mechanical properties and reduce the coefficient of thermal expansion alloys, Al-Si. The effect of heat treatment on mechanical properties, density and thermal expansion of synthetic alloys was researched.

Ключевые слова. Синтетические сплавы алюминия с кремнием, водород, кремнезем, механические свойства, тепловое расширение.

Keywords. Synthetic alloys of aluminum and silicon, hydrogen, silica, mechanical properties, thermal expansion.

Современное машиностроение широко использует сплавы алюминия с кремнием для приготовления отливок ответственного назначения.

Для получения сплавов окончательного химического состава применяются шихтовый алюминий технической чистоты и дорогостоящий кристаллический кремний.

Для снижения себестоимости шихты и, в конечном итоге, стоимости конструкционных алюминиевых сплавов необходимо применение новых ресурсосберегающих технологий. В этом направлении перспективными являются технологические схемы, исключая использование кристаллического кремния.

Известны способы получения сплавов алюминия с кремнием, предусматривающие применение кремнезема (SiO_2). Их можно разделить на три группы: электротермические; металлотермические; электролиз ионных расплавов.

Электролитический способ включает в себя приготовление кремнезема – глиноземной шихты и ее углетермическое восстановление в электропечи.

К металлотермическим способам производства сплавов прежде всего относится магниевотермический [1], который предусматривает получение сплавов Al-Si из магнийсодержащего сырья. Этот способ осуществляется введением в расплав кварцевого песка и восстановлением кремнезема по реакции:



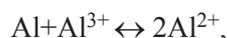
При содержании магния в исходном сплаве, равным 10%, был получен сплав, содержащий 11,7% Si и 0,002% Mg [1].

Значительные потенциальные возможности получения металлов и сплавов заключены в электролизе ионных расплавов. Например, сплавы, содержащие от 6 до 14% кремния, предлагается получать электролизом расплава $\text{Na}_3\text{AlF}_6\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ путем одновременного катодного соосаждения Al и Si [2].

В настоящее время ни один из перечисленных методов не нашел широкого применения в промышленности, что можно объяснить следующим. Электротермические сплавы в силу специфики производства (высокотемпературное углетермическое восстановление оксидов Si и Al) загрязнены оксидными и карбидными включениями, удаление которых сопряжено с технологическими трудностями. В целом электротермическое производство силумина характеризуется высокой энергоемкостью, что с учетом дополнительных затрат на выпечную очистку от включений определяет высокую себестоимость продукции.

Снижение энергетических затрат достигается при металлотермическом получении сплавов за счет проведения его при пониженных температурах (700–900 °С), а если учесть, что получение и рафинирование сплавов осуществляются в одном и том же металлургическом агрегате, то этот способ обеспечивает минимальную себестоимость продукции. Особо важное значение металлотермический способ приобретает при переработке вторичного сырья. Для реализации этого способа на первичном алюминии требуется его легирование металлами – восстановителями кремнезема (например, Mg, Ti и т. д.), что в определенной мере ограничивает области его применения. К этому следует добавить, что процесс характеризуется малой удельной скоростью, особенно на завершающей стадии.

С точки зрения себестоимости сплавы, получаемые при электролизе ионных расплавов, занимают промежуточное положение между представленными выше способами. Существенным ограничением электролитического способа является обратное растворение компонентов целевого сплава, например алюминия, в расплаве солей по реакции:



а также необходимость нагрева «балластного» материала, являющегося электролитом.

Из рассмотренных способов приготовления сплавов, использующих кремнезем, наибольший практический интерес представляет способ, основанный на восстановлении SiO_2 в среде расплавленного алюминия. Однако присущие ему недостатки не позволяют рекомендовать его для широкого внедрения в промышленности. С целью совершенствования металлотермического способа получения сплавов необходимо проведение исследований в двух основных направлениях:

- 1) интенсификация окислительно-восстановительных процессов, протекающих в системе Al-Mg-SiO₂;
- 2) замена металлов-восстановителей другими более активными элементами, например водородом.

В настоящей работе проведено исследование возможностей интенсификации магниевотермического восстановления кремнезема и получения сплавов алюминиево-кремниевых с использованием алюминия технической чистоты и кремнезема.

Поскольку в алюминии и его сплавах всегда присутствует водород, было сделано предположение о возможном его участии в восстановлении кремнезема в расплавленном алюминии. Для доказательства этого предположения были проведены эксперименты на вторичном и первичном алюминии, предусматривающие предварительное наводороживание или дегазацию расплава (продувкой аргоном).

Исследования проводили в лабораторных условиях с выплавкой сплавов в шахтной печи сопротивления в интервале температур 750–1100 °С по следующей методике. Навеску алюминия А7 или сплава алюминия с магнием помещали в корундовый тигель и расплавляли. После достижения заданной температуры расплав наводороживали путем продувки водяным паром. Затем на поверхность расплава загружали кварцевый песок в количестве 5–10% от массы расплава. После перемешивания продолжали продувку водяным паром в течение 20–30 мин. Операции наводороживания, введения кремнезема и перемешивания составляют один цикл обработки. Контроль за текущим содержанием кремния в расплаве осуществляли путем химического анализа проб, отбираемых через определенные промежутки времени.

Завершающими этапами процесса являлись циклы обработки расплава, включающие периодическое (с интервалом 20 мин) наводороживание, перемешивание и выстаивание расплава в течение 10 мин. Циклы синтеза, предусматривающие внесение кремнезема, и циклы обработки расплава имеют общие стадии наводороживания и перемешивания расплава, поэтому при анализе процесса они были объединены

общим названием – цикл обработки. Общее время синтеза составило 180 мин, что соответствует шести циклам обработки.

Готовый сплав после удаления шлака разливали в алюминиевый кокиль, а полученные слитки взвешивали и использовали в дальнейшем для изготовления образцов для проведения комплексных исследований с привлечением механических испытаний, металлографического и дилатометрического анализов.

На первом этапе исследования проводили на вторичном алюминии, содержащем 10% магния. Отличительная особенность этой методики проведения исследований заключалась в следующем: во-первых, температура ведения процесса 770–780 °С; во-вторых, разовая загрузка кварцевого песка, предварительно подогретого до 870 °С и взятого в количестве 25% от массы расплава; в-третьих, непрерывная продувка расплава водяным паром в течение 120–180 мин.

Результаты влияния времени обработки расплава водяным паром на содержание в нем магния и кремния приведены в табл. 1, 2. Для сравнения представлены также соответствующие данные по составу расплава, который перемешивался без водяного пара [1].

Т а б л и ц а 1. Влияние времени обработки расплава на содержание магния в сплаве

Вид обработки	Содержание магния, мас. %						
	время, мин						
	60	90	120	150	180	240	270
Перемешивание	4,73	2,41	1,03	0,54	0,31	0,18	0,15
Перемешивание с одновременной продувкой водяным паром	4,06	1,65	0,68	0,27	0,16	–	–

Т а б л и ц а 2. Влияние времени обработки расплава на содержание кремния в сплаве

Вид обработки	Содержание кремния, мас. %						
	время, мин						
	60	90	120	150	180	240	270
Перемешивание	4,4	5,6	6,9	8,2	9,6	11,8	13,6
Перемешивание с одновременной продувкой водяным паром	5,3	7,6	9,4	11,7	13,0	–	–

Из таблиц видно, что обработка расплава водяным паром позволяет в 1,5–1,6 раза сократить время процесса получения синтетических сплавов с содержанием кремния 11–13 мас.% из вторичного магнийсодержащего алюминия. Наблюдаемые кинетические закономерности окисления магния и восстановления кремнезема в системе Al-Mg-SiO₂-H₂O можно объяснить следующим образом.

При обработке расплава водяным паром наряду с реакцией (1) будут проходить следующие окислительно-восстановительные процессы:



Сопоставляя реакции (1)–(3), можно отметить, что на получение 1 г-атома кремния расходуется 2 г-атома магния, а кремнезем восстанавливается как продуктами распада молекул H₂O, так и непосредственно магнием и алюминием. При этом реакция (4) имеет место независимо от способа обработки расплава. Следовательно, интенсификация процесса получения сплавов и соответственно вывода магния из вторичного алюминия с использованием кремнезема достигается за счет реакций (2) и (3), протекающих при обработке расплава водяным паром, т.е. водород принимает активное участие в процессе восстановления SiO₂.

Для дальнейшего подтверждения предположения об активной роли водорода в восстановительных процессах, протекающих в объеме расплава, были проведены исследования на первичном алюминии технической чистоты по той же методике. Поскольку восстановление кремнезема может проходить за

счет реакции взаимодействия с алюминием (реакция (4)), то необходимо оценить ее вклад в суммарный процесс получения сплава. С этой целью были проведены опыты, в которых обработку расплава осуществляли продувкой аргоном, т.е. в условиях, предусматривающих частичное удаление водорода из расплава. Результаты этих опытов для сравнения, а также соответствующие данные, полученные при обработке расплава водяным паром, приведены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3. Влияние обработки расплава на содержание кремния в синтетическом сплаве (один цикл при 900 °С)

Характеристика газа	Количество вносимого кремнезема, % от массы расплава	Время продувки, мин	Содержание кремния в сплаве, мас. %
Аргон	5	20	0,60
Аргон	8	25	0,90
Аргон	10	30	1,10
Водяной пар	5	20	3,90
Водяной пар	8	25	4,05
Водяной пар	10	30	4,68

Из таблицы следует, что относительный вклад реакции (4) довольно значителен и в процентном соотношении составляет величину, изменяющуюся в пределах 16–23, при этом относительный вклад возрастает с увеличением количества вносимого кварцевого песка при прочих равных условиях, что можно объяснить увеличением поверхности контакта алюминия с кремнеземом. Изменение температуры обработки в пределах 800–1100 °С незначительно влияет на величину относительного вклада реакции (4). Последнее косвенно свидетельствует о том, что ведущим механизмом взаимодействия является изоморфное замещение кремния алюминием в структуре кремнезема.

Результаты исследования влияния температуры и количества циклов обработки расплава водяным паром на содержание кремния в конечном сплаве, полученном в случае трех циклов синтеза и трех циклов обработки расплава, приведены в табл. 4. При этом в одном цикле синтеза в расплав вводили 8% SiO₂ при 750, 800 °С и 11% SiO₂ при 900, 1000 °С.

Т а б л и ц а 4. Влияние температуры и количества циклов обработки расплава водяным паром на содержание кремния в синтетическом сплаве

Температура, °С	Содержание кремния, мас. %					
	число циклов					
	1	2	3	4	5	6
750	1,7	2,6	3,5	7,5	13,0	14,1
800	3,0	6,4	8,7	12,0	14,2	15,8
900	4,0	9,6	11,8	13,2	15,1	17,0
1000	5,0	12,0	13,5	15,9	17,7	18,4
1100	6,0	13,0	14,0	17,0	18,8	20,0

Из таблицы видно, что в изотермических условиях ведения процесса получения сплава содержание кремния закономерно возрастает с увеличением числа циклов обработки. При этом максимальная скорость накопления кремния наблюдается в случае получения сплавов доэвтектического и эвтектического состава, особенно при повышенных температурах.

Такой способ получения сплавов алюминия с кремнием повышает их механические свойства по сравнению с обычным приготовлением. Очень важно, что у заэвтектических сплавов повышаются и прочность, и пластичность одновременно (табл. 5).

Т а б л и ц а 5. Механические свойства сплавов Al-Si

Содержание кремния, мас. %	Обычного приготовления			Синтетические		
	σ _в , МПа	δ, %	H _ц , МПа	σ _в , МПа	δ, %	H _ц , МПа
6	134	10,2	189	139	8,8	326
8	138	8,7	279	143	4,5	472
11	141	3,4	303	160	2,7	671
13	148	2,0	340	167	2,6	761
15	147	1,4	386	179	1,7	823
20	120	0,3	430	140	0,9	920

Микротвердость эвтектики при увеличении содержания кремния увеличивается. Получение сплавов на кремнеземе резко усиливает это повышение. Возможно, это связано с тем, что при разложении SiO_2 в жидком алюминии освобождающийся кислород, кроме удаления в шлак, еще и легирует α -твердый раствор.

Для проверки влияния масштабного фактора на технологические показатели процесса получения сплавов были проведены исследования в условиях Новокузнецкого алюминиевого завода. Выплавку проводили в индукционной печи в графитовом тигле, причем масса загруженного первичного алюминия составляла 20 кг. Результаты этих опытов показали незначительное уменьшение содержания кремния в сплаве при соответствующих режимах ведения процесса в лабораторных условиях (см. табл. 4). Например, при 750 °С за 4 цикла обработки расплава был получен сплав, содержащий 7,2% кремния, а при 900 °С за такое же число циклов обработки содержание кремния составило 12,1%. Наблюдаемое относительное снижение содержания кремния в конечном сплаве (возрастающее с повышением температуры) можно отнести за счет увеличения теплоотдачи в окружающую среду в случае выплавки сплава в индукционной печи и соответственным снижением температуры поверхностного слоя расплава.

В результате восстановления кремнезема в среде расплавленного алюминия в присутствии водяных паров образуется шлак. Сплав, полученный в этом случае, назван авторами синтетическим для формального разделения от сплава, приготовленного на кристаллическом кремнии.

Таким образом, на основании представлений о ведущей роли водорода в получении металлических материалов, базирующихся на водородной платформе периодической системы элементов [3–5], показана принципиальная возможность получения новых сплавов Al-Si без применения дорогостоящего кристаллического кремния.

Практическая реализация разработанного способа

После установления принципиальной возможности получения сплавов Al-Si на SiO_2 с помощью водорода необходимо определить области их применения.

В ГОСТ 1583-93 приведено 25 сплавов систем Al-Si, Al-Si-Mg и Al-Si-Cu, поэтому, прежде всего, следует определить свойства промышленных сплавов, приготовленных на синтетическом шихтовом двойном сплаве Al-Si. Это послужит основанием для развития новой водородной металлургии алюминий-кремниевых существующих и будущих новых сплавов с требуемыми структурно-технологическими свойствами.

Для приготовления сплавов АК7ч и АК9ч применяли алюминий А0 и АВ97 и синтетический сплав А1-11–13% Si.

Специально приготовленные промышленные сплавы содержали ГОСТовское и повышенное содержание железа (табл. 6).

Сплавы АК9ч и АК7ч приготавливали в лабораторных условиях в алундовых тиглях при 730°С и заливали в алюминиевый кокиль. Полученные слитки разрезали для изготовления образцов для металлографических исследований, механических испытаний и измерения плотности и определения коэффициента линейного расширения (КЛР). Приготовление образцов и их испытания проводили по стандартным методикам.

Сплав АК9ч

Микроструктура сплавов АК9ч с различным содержанием железа, приготовленных на синтетическом сплаве, по размерам и характеру распределения структурных составляющих (участков α -твердого раствора кремния в алюминии и в эвтектике) не отличается от сплавов такого типа, полученных на кристаллическом шихтовом кремнии. В высокожелезистых сплавах наблюдаются пластинчатые выделения фаз Al_3Fe . Термическая обработка сплава № 1 по ГОСТ (табл. 7) по режиму Т6 (535 °С, 2 ч, вода, старение 175 °С, 10 ч, воздух) приводит к измельчению выделений α -твердого раствора и огрублению эвтектики. После термической обработки сплава № 3 по такому же режиму Т6 происходит укрупнение участков α -твердого раствора и фазы Al_3Fe . Свойства этих сплавов приведены в табл. 7.

По уровню прочности и пластичности новые сплавы АК9ч не уступают сплавам обычного приготовления. Например, сплав № 1 по ГОСТ, содержащий 0,6% Fe, имеет в литом состоянии $\sigma_b = 178$ МПа и $\delta = 2,0\%$. Термическая обработка повышает и прочность, и пластичность всех изученных сплавов типа АК9ч.

Особое внимание уделено влиянию приготовления на КЛР сплавов, так как они в перспективе могут быть применены для изготовления поршней двигателей внутреннего сгорания (ДВС) и изделий прибор-

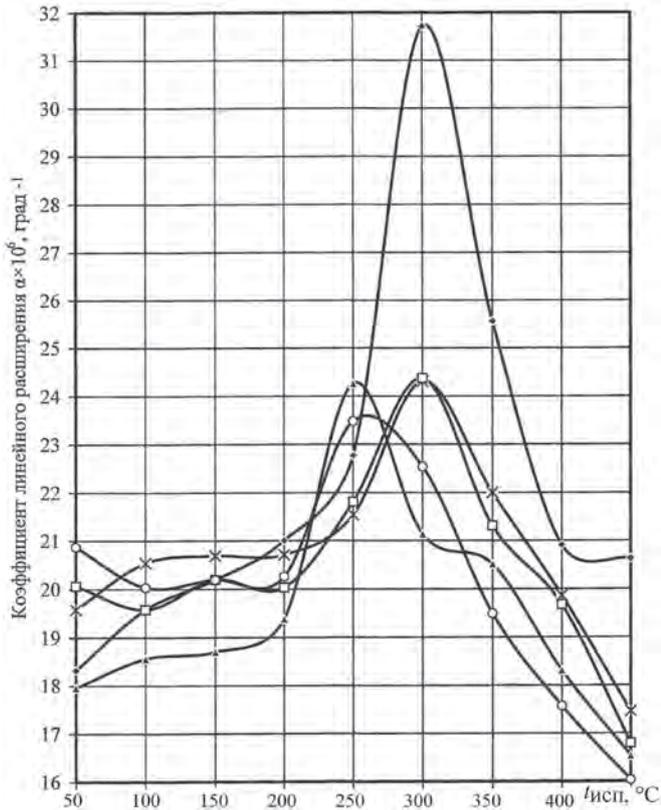


Рис. 1. Линейное расширение литого сплава АК9ч, приготовленного на синтетическом силумине *0 – сплав обычного приготовления: \diamond – 0; ∇ – 1; \times – 2; \square – 3; \circ – 4

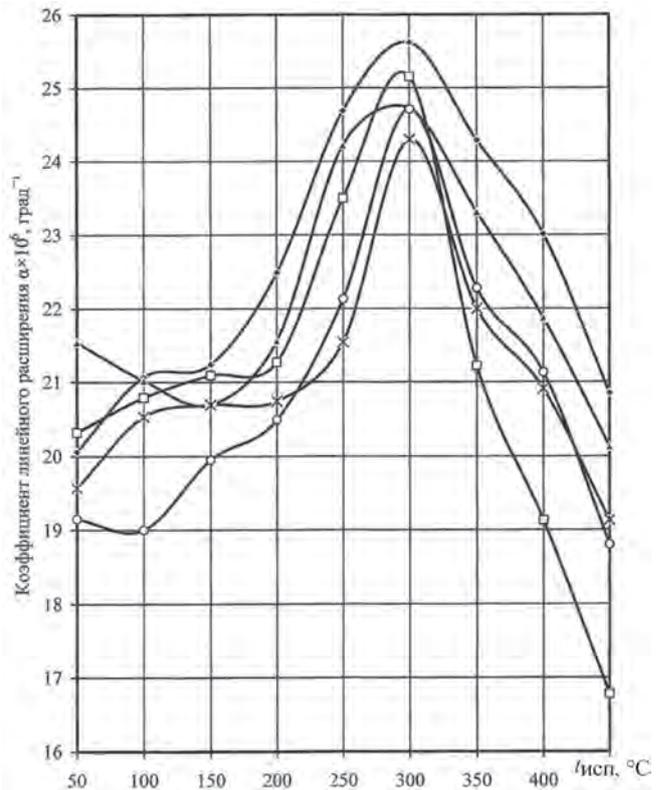


Рис. 2. Линейное расширение литого сплава АК7ч, приготовленного на синтетическом силумине *0 – сплав обычного приготовления: \diamond – 0; ∇ – 5; \times – 6; \square – 7; \circ – 8

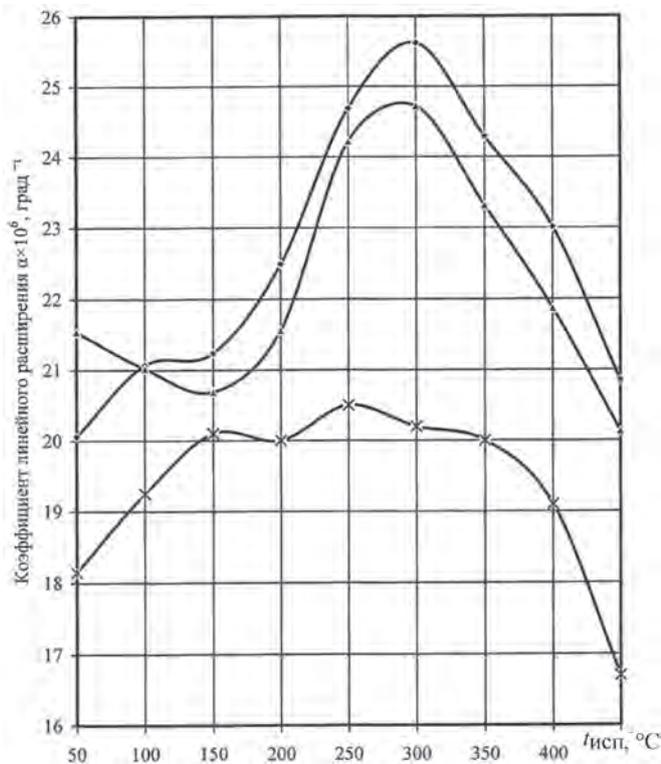


Рис. 3. Влияние условий приготовления и термической обработки на линейное расширение литого сплава АК7ч. Термическая обработка: 535 °С, 2 ч, вода +175 °С, 10 ч, воздух; \diamond – обычного приготовления; ∇ – приготовление на синтетическом силумине; \times – приготовление на синтетическом силумине + термическая обработка

ной техники. Установлено, что новое приготовление уменьшает КЛР сплава № 1 по ГОСТ во всем диапазоне температур испытания (50–450 °С). Увеличение содержания железа дополнительно резко снижает аномалию КЛР при $t_{исп} = 250\text{--}300$ °С (рис. 1).

Сплав АК7ч

Микроструктура маложелезистых сплавов (составы приведены в табл. 6) характеризуется участками α -твердого раствора и модифицированной эвтектикой, а по характеру распределения и количественному соотношению между структурными составляющими подобна сплавам обычного приготовления.

Термическая обработка новых сплавов по режиму Т6 приводит к укрупнению участков α -твердого раствора, огрублению эвтектики и частичному растворению интерметаллической фазы.

Свойства исследованных сплавов в литом и термообработанном состояниях приведены в табл. 8. Из таблицы видно, что приготовление на кремнеземе повышает механические свойства. Значения КЛР новых сплавов приведены на рис. 2. Из рисунка следует, что для этого типа сплавов увеличение содержания железа сопровождается уменьшением коэффициента линейного расширения в интервале температур 50–450 °С.

Новый сплав состава № 5 по ГОСТ имеет КЛР практически одинаковый со сплавом обычного приготовления. Очень важно, что термическая обработка его снижает КЛР во всем интервале испытания 450 °С и полностью устраняет аномалию при температуре испытания 300 °С (рис. 3), что очень важно для поршней двигателей внутреннего сгорания.

Приведенное наглядно убеждает, что новая водородная металлургия сплавов Al-Si перспективна и даст значительный экономический эффект.

Т а б л и ц а 6. Состав промышленных сплавов, приготовленных на синтетическом силумине

Номер сплава	Сплав (ГОСТ 1583-93)	Содержание основных компонентов, мас.%, Al – остальное			
		Si	Mg	Mn	Fe
1	АК9ч	9,10	0,27	0,40	0,60
2	То же	9,70	0,25	0,41	1,80
3	»	9,20	0,23	0,43	2,32
4	»	9,50	0,25	0,41	3,07
5	АК7ч	7,81	0,37	–	0,65
6	То же	7,55	0,37	–	1,66
7	»	7,37	0,34	–	1,84
8	»	7,24	0,33	–	2,90

Т а б л и ц а 7. Влияние термической обработки на механические свойства и плотность сплава АК9ч, приготовленного на синтетическом силумине

Номер сплава	Состояние	Временное сопротивление разрыву, σ_b , МПа	Относительное удлинение δ , %	Твердость НВ, МПа	Плотность ρ , кг/м ³
1	Литой	178	1,9	600	2680
	Термообработанный	256	2,1	–	–
2	Литой	157	1,5	630	2710
	Термообработанный	225	1,8	–	–
3	Литой	96	1,0	720	2720
	Термообработанный	114	1,0	–	–

Термообработка: 535 °С, 2 ч, вода + 175 °С, 10 ч, воздух.

Т а б л и ц а 8. Влияние термической обработки на механические свойства и плотность сплава АК7ч, приготовленного на синтетическом силумине

Номер сплава	Состояние	Временное сопротивление разрыву σ_b , МПа	Относительное удлинение δ , %	Твердость НВ, МПа	Плотность ρ , кг/м ³
5	Литой	174	1,3	690	2680
	Термообработанный	245	1,7	–	–
6	Литой	168	1,3	670	2710
	Термообработанный	193	1,5	–	–
7	Литой	160	1,2	724	2710
	Термообработанный	192	1,3	–	–
8	Литой	60	0,4	710	2720
	Термообработанный	106	0,5	–	–

Термообработка: 535 °С, 2 ч, вода + 200 °С, 3 ч, воздух.

Литература

1. Патент США № 4097270, кл. 75–68, опубл. 27.06.1978 г.
2. Д е л и м а р с к и й Ю. К. Теоретические основы электролиза ионных расплавов. М.: Металлургия, 1968. 223 с.
3. А ф а н а с ь е в В. К. Водородная платформа периодической системы элементов. Часть I // Металлургия машиностроения. 2011. №2. С. 21–26.
4. А ф а н а с ь е в В. К. Водородная платформа периодической системы элементов. Часть II // Металлургия машиностроения. 2012. № 4. С. 3–7.

References

1. Patent USA, no 4097270, kl 75-68, publ 27.06.1978.
2. D e l i m a r s k i y Y u. K. *Teoreticheskie osnovy elektroliza ionnykh rasplavov* [Theoretical bases of electrolysis of ionic fusions]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1968. 223 p.
3. A f a n a s i e v V. K. Vodorodnaya platforma periodicheskoy sistemy elementov [Hydrogen platform of the periodic system of elements]. Part I. *Metallurgiya mashinostroeniya – Metallurgy of Engineering*. 2011, no. 2, pp. 21–26.
4. A f a n a s i e v V. K. Vodorodnaya platforma periodicheskoy sistemy elementov [Hydrogen platform of the periodic system of elements]. Part II. *Metallurgiya mashinostroeniya – Metallurgy of Engineering*. 2012, no. 4, pp. 3–7.

Сведения об авторах

Афанасьев Владимир Константинович, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой материаловедения и технологии новых материалов, Сибирский государственный индустриальный университет, Россия, 654080, г. Новокузнецк, ул. Грдины, 26, кв. 16. E-mail: w.afanasev@nvkz.kuzbass.net.

Марукович Евгений Игнатьевич, акад., д-р техн. наук, проф., Институт технологии металлов НАН Беларуси, Беларусь, 212030, г. Могилев, ул. Бялицкого-Бирули, 11. Тел.: +375 (222) 279-367. E-mail: info@itm.by.

Information about the authors

Afanasiev Vladimir, Doctor of Engineering, Professor, Chairman of the Department of new material technologies and material engineering, 26-16 Grdiny str., Novokuznetsk city, 654080, Russia, E-mail: w.afanasev@nvkz.kuzbass.net.

Marukovich Evgeny, Academician of National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Engineering, Professor, Institute of Technology of Metals of National Academy of Sciences of Belarus. 11, Bialynitskogo-Biruli str., Mogilev, 212030 Belarus. E-mail: info@itm.by.