



УДК 621.74.699

Б. М. Неменёнок, С. П. Задруцкий, Г. В. Довнар, А. А. Пивоварчик, А. С. Панасюгин

## ТЕРМОДИНАМИКА МОДИФИЦИРОВАНИЯ СИЛУМИНОВ КАРБОНАТОМ СТРОНЦИЯ

Целью данной работы является проведение исследований по определению вероятности протекания химических, а также фазовых превращений в системе  $\text{SrCO}_3\text{-Al-Si}$  с использованием метода термодинамического моделирования. Научная новизна работы состоит в получении новых экспериментальных данных по определению вероятности протекания химических и фазовых превращений в системе  $\text{SrCO}_3\text{-Al-Si}$  в реальных производственных условиях при различных интервалах температуры и давлений. Во введении приведены теоретические сведения по материалам, используемым при модифицировании расплава алюминия. Описаны достоинства и недостатки использования таких модифицирующих материалов, как натрий, сурьма и стронций. В основной части работы представлена методика проведения исследований по определению вероятных химических и фазовых превращений в системе  $\text{SrCO}_3\text{-Al-Si}$  с использованием метода компьютерного моделирования с применением программного комплекса HSC Chemistry. Представлены результаты термодинамического анализа вероятности фазовых превращений в исследованном диапазоне температур и давлений. Установлено, что с увеличением температуры расплава с 943 до 1173 К и уменьшением глубины погружения колокольчика с  $\text{SrCO}_3$  в жидкий силумин с 1,0 м до зеркала металла отмечается плавная интенсификация реакции  $2\text{SrCO}_3 + 2\text{Al} \rightarrow 2\text{Sr} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CO} + \text{CO}_2$ . Полученные результаты исследований будут полезны технологам при выборе материалов, применяемых в качестве рафинирующих и модифицирующих добавок при выплавке алюминиевых сплавов, а также выплавке чушки из алюминиевого кускового лома.

**Ключевые слова:** силумин, модифицирующее действие, расплав, карбонат стронция, колокольчик, лигатура, термодинамический анализ, энергия Гиббса.

**Введение.** Несмотря на то, что в настоящее время известно более 40 элементов, оказывающих модифицирующее действие на структуру эвтектики в силуминах [1], практическое применение на постсоветском пространстве получил натрий, который вводится в сплавы обычно в виде фтористых соединений в составе флюсовых композиций, состоящих из смеси фтористых и хлористых солей. К недостаткам

*Неменёнок Болеслав Мечеславович*, д-р техн. наук, проф., зав. каф. металлургии литейных сплавов БНТУ (Беларусь).

*Адрес для корреспонденции:* пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь; e-mail: nemenenok@tut.by

*Задруцкий Сергей Петрович*, канд. техн. наук, доц. каф. металлургии литейных сплавов БНТУ (Беларусь).

*Адрес для корреспонденции:* пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь; e-mail: zadrutskij@bntu.by

*Довнар Геннадий Витольдович*, канд. техн. наук, доц. каф. металлургии литейных сплавов БНТУ (Беларусь).

*Адрес для корреспонденции:* пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь; e-mail: gvdoynar@bntu.by

*Пивоварчик Александр Антонович*, канд. техн. наук, доц., доц. каф. машиноведения и технической эксплуатации автомобилей ГрГУ им. Янки Купалы (Беларусь).

*Адрес для корреспонденции:* ул. Ожешко, 22, 230023, г. Гродно, Беларусь; e-mail: Pivovarchik\_AA@grsu.by

*Панасюгин Александр Семёнович*, канд. хим. наук, зав. научно-исследовательской и испытательной лабораторией очистки газовых выбросов литейных цехов БНТУ (Беларусь).

*Адрес для корреспонденции:* пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь; e-mail: niilogaz@tut.by

обработки расплава натрием относят необходимость тщательного контроля дозировки модификатора, нарушение которой связано с опасностью получения частично модифицированной или перемодифицированной структуры, снижение жидкотекучести силумина, повышенный расход тиглей, увеличение склонности расплава к газопоглощению, развитие рассредоточенной газоусадочной пористости в отливках. Но основной сложностью в работе с натрием является ограниченное время сохранения модифицирующего эффекта, как правило, не более 30 мин, что связано с испарением и окислением легкоплавкого Na [2].

Большинство опробованных альтернативных модифицирующих присадок на базе других элементов не получило промышленного развития из-за различных технических и экономических трудностей. Исключения составляют стронций и сурьма [2], основным преимуществом которых по отношению к натрию является высокая живучесть, т.е. большая длительность сохранения модифицирующего эффекта. Так, модифицирующий эффект после обработки расплава стронцием в количестве 0,08 % от массы расплава сохраняется до 8 ч и даже после нескольких переплавов [3–5]. Присадки сурьмы в количестве 0,2 % также дают длительный модифицирующий эффект, сохраняющийся после переплава [6–8].

Однако промышленное применение сурьмы в качестве модификатора эвтектики силуминов в цветно-литейных цехах на постсоветском пространстве пока не представляется возможным ввиду ее высокой токсичности, а также из-за того, что Sb является демодификатором в сплавах, модифицированных повсеместно применяемым натрием из-за образования соединения  $\text{Na}_3\text{Sb}$  [9].

Стронций наряду с длительным модифицирующим эффектом хорошо сочетается с натрием и дополняет его [6; 9–11]. В зарубежной цветно-литейной практике Sr в качестве модификатора эвтектического кремния применяется достаточно широко.

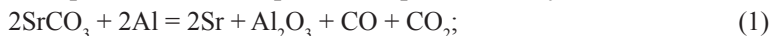
В связи с тем, что введение стронция в расплавы силумина в металлическом виде затруднено из-за его самовозгорания и токсичности паров, а также необходимости повышения температуры расплава, что, в свою очередь, влечет за собой дополнительные энергозатраты, повышение газопоглощаемости, а также учитывая высокую стоимость Sr, в настоящее время для модифицирования эвтектического кремния используют стронцийсодержащие лигатуры или различные модифицирующие и универсальные флюсы, содержащие в своем составе соли Sr.

Применение лигатурного модифицирования в отечественном цветно-литейном производстве затруднено в первую очередь из-за высокой стоимости Sr-содержащих лигатур и отсутствия отечественного производителя. Кроме того, применение в действующих технологических цепочках стронциевых лигатур создает дополнительные трудности, связанные с их высоким водородсодержанием, окисленностью, гигроскопичностью, а зачастую недостаточной эффективностью и необходимостью дополнительного их переплава и подготовки.

Стронцийсодержащие флюсы имеют в своем составе  $\text{SrCl}_2$ ,  $\text{SrF}_2$ ,  $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ , а также ряд других хлористых и фтористых соединений, что вызывает определенные трудности с решением экологических проблем [12–16]. Таким образом, представляет интерес изучение модифицирующего действия карбоната стронция, основными преимуществами которого по сравнению с другими Sr-содержащими солями являются экологическая безвредность и относительно невысокая стоимость. Необходимо заметить, что литературные данные по использованию карбоната стронция в качестве модификатора эвтектического кремния в силуминах носят разрозненный характер [1; 17–19], отсутствует термодинамическое рассмотрение поведения  $\text{SrCO}_3$  в расплаве силумина, однако все авторы подтверждают модифицирующее действие  $\text{SrCO}_3$  на включения эвтектического кремния.

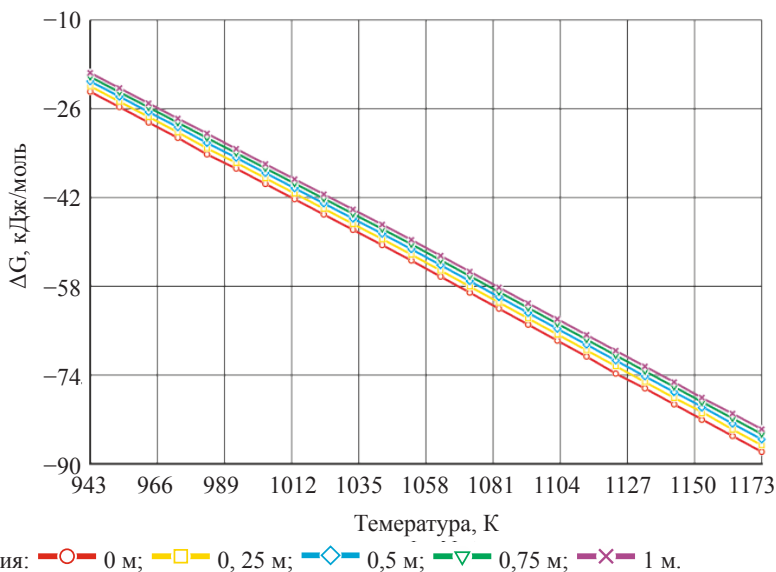
В связи с вышесказанным интерес представляет проведение исследований в области термодинамического моделирования вероятных химических и фазовых превращений в системе  $\text{SrCO}_3$ -Al-Si.

**Экспериментальная часть.** Моделирование проводили на основе минимизации изобарно-изотермического потенциала и максимизации энтропии системы при учете всех потенциально возможных в равновесии индивидуальных веществ, при различных температурах и давлениях с использованием программного комплекса HSC Chemistry. В процессе термодинамического моделирования рассматривали результирующие реакции (1) и (2) перехода стронция из его карбоната в расплав силумина:

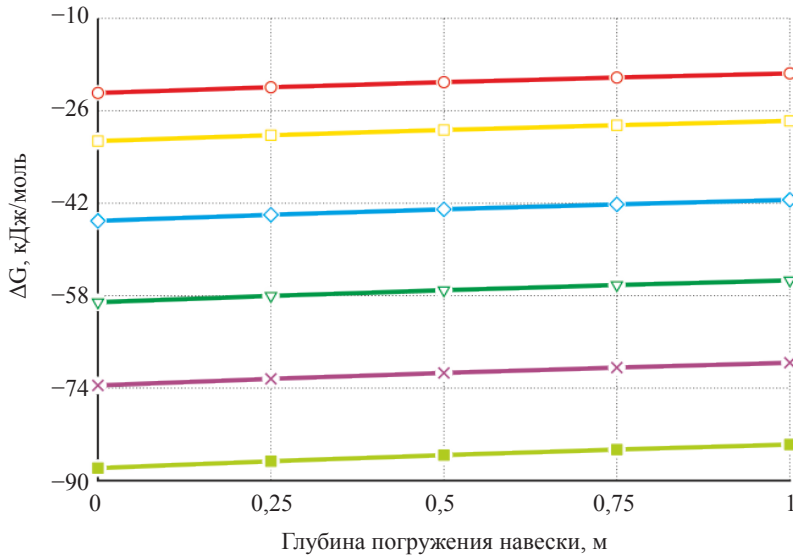


Исследуемый температурный диапазон и область давлений выбирали исходя из реальных производственных условий. Так, температура модифицирующей обработки расплавов на основе алюминия, как правило, находится в пределах 943–1173 К. Причем нижняя граница лимитирована началом образования твердой фазы и снижением скорости протекания конвекционных процессов в расплаве, а верхняя – увеличением энергоемкости плавки, повышением газонасыщения, интенсификацией окисления компонентов расплава и модифицирующих элементов при перегреве. Область исследуемого диапазона давлений находилась в пределах 101,33–125,45 кПа. Нижнее значение соответствовало давлению на зеркале расплава, а верхнее регламентировалось глубиной погружения колокольчика с рафинирующим реагентом в расплав (в данном случае – с карбонатом стронция). При этом глубина погружения колокольчика не превышала 1,0 м и принималась для нижней границы температурного интервала равной 943 К. Для данной глубины погружения колокольчика характерно наиболее высокое значение плотности расплава силумина эвтектического состава (2462 кг/м<sup>3</sup>) в исследуемом диапазоне температур.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Проведенный полный термодинамический анализ в исследованном диапазоне температур и давлений однозначно свидетельствует о протекании реакции  $2\text{SrCO}_3 + 2\text{Al} \rightarrow 2\text{Sr} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CO} + \text{CO}_2$  в сторону восстановления стронция (рисунки 1 и 2), причем с повышением температуры и снижением давления изучаемая реакция становится термодинамически более выгодной, так как сопровождается уменьшением энергии Гиббса.



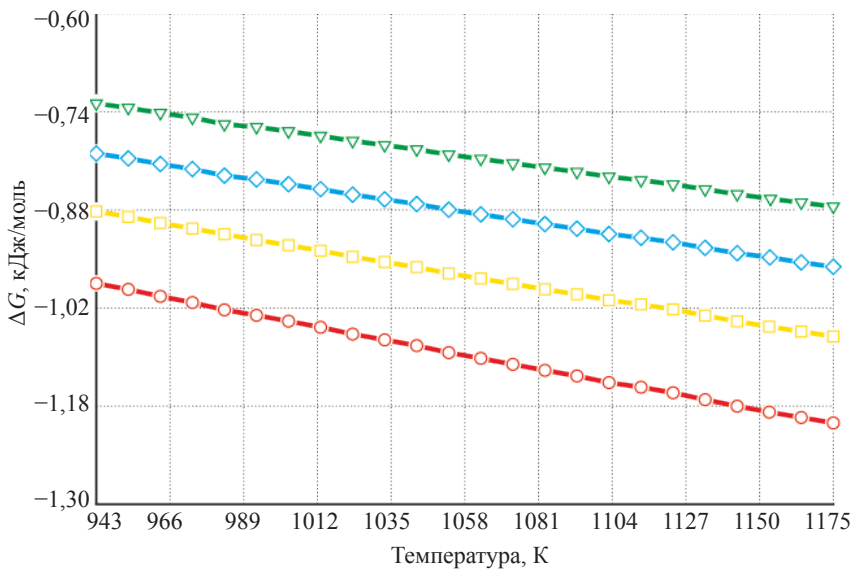
**Рисунок 1** – Зависимость изменения энергии Гиббса реакции  $2\text{SrCO}_3 + 2\text{Al} \rightarrow 2\text{Sr} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CO} + \text{CO}_2$  от температуры при различной глубине погружения навески карбоната стронция в расплав алюминия



Пояснения: ○ — 943 К; □ — 973 К; ◇ — 1023 К; ▽ — 1073 К; × — 1123 К; ■ — 1173.

Рисунок 2 – Зависимость изменения энергии Гиббса реакции  $2\text{SrCO}_3 + 2\text{Al} \rightarrow 2\text{Sr} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CO} + \text{CO}_2$  от глубины погружения навески  $\text{SrCO}_3$  в расплав алюминия при различных температурах

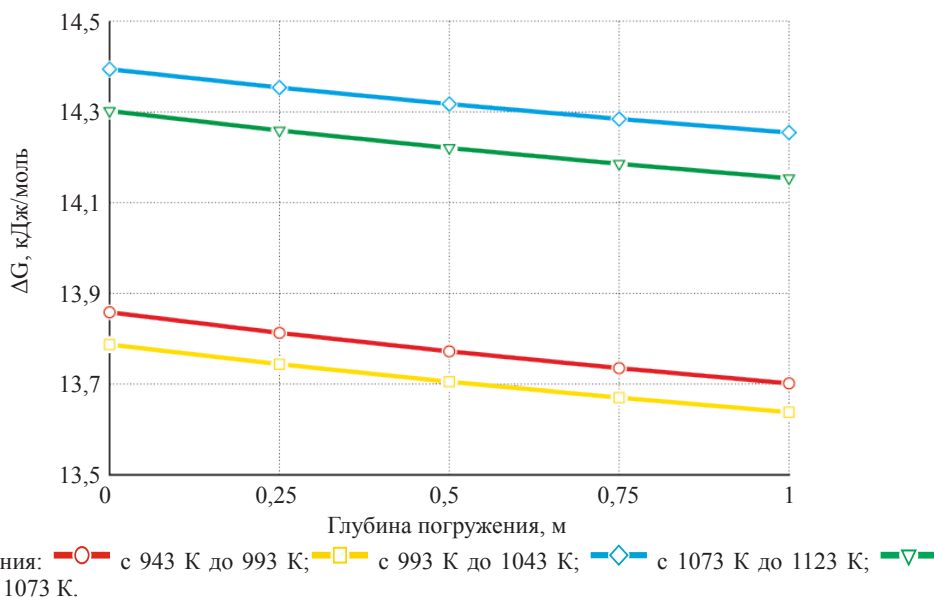
Так, при температуре 943 К для давлений 103,33 кПа (на поверхности расплава) и 125,45 кПа (глубина погружения колокольчика 1,0 м) изменение изобарно-изотермического потенциала для реакции взаимодействия карбоната кальция с алюминием составит соответственно  $-22,91$  и  $-19,52$  кДж/моль, для температуры 1173 К соответствующие показатели будут  $-87,83$  и  $-83,75$  кДж/моль соответственно.



Пояснения: ○ — с зеркала металла до 0,25 м; □ — с 0,25 до 0,5 м; ◇ — с 0,5 м до 0,75 м; ▽ — с 0,75 до 1 м.

Рисунок 3 – Зависимость разности изменений изобарно-изотермического потенциала реакции  $2\text{SrCO}_3 + 2\text{Al} \rightarrow 2\text{Sr} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CO} + \text{CO}_2$  от температуры при фиксированном увеличении глубины погружения навески карбоната стронция в расплав алюминия

Необходимо заметить (рисунок 3), что с фиксированным повышением давления значение разности изменений изобарно-изотермического потенциала при каждой конкретной температуре снижается, причем указанное явление больше проявляется при повышенных температурах. Разность изменений энергии Гиббса при фиксированном повышении температуры снижается при повышении давления в системе (рисунок 4).



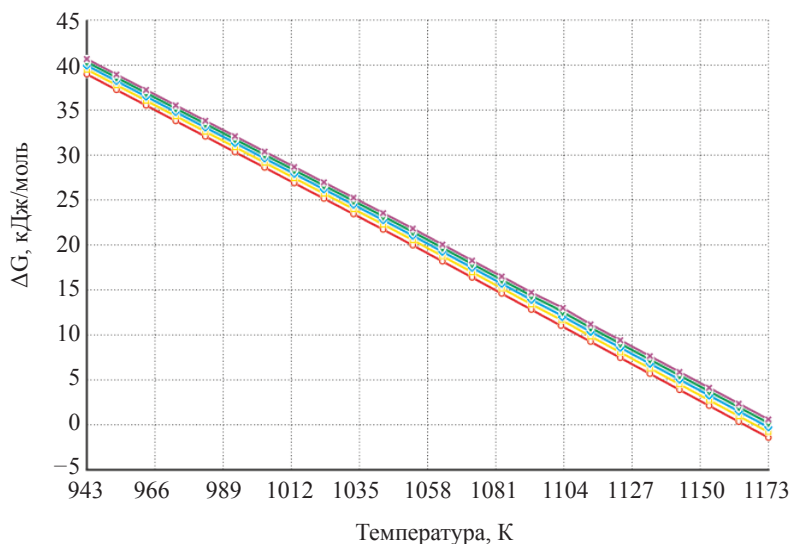
**Рисунок 4 – Зависимость разности изменений изобарно-изотермического потенциала реакции  $2\text{SrCO}_3 + 2\text{Al} \rightarrow 2\text{Sr} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CO} + \text{CO}_2$  от глубины погружения навески  $\text{SrCO}_3$  в расплав алюминия при увеличении температуры**

Таким образом, для температуры 943 К разность между изменениями энергии Гиббса при повышении давления в рассматриваемой системе с 101,33 до 107,36 кПа (погружение карбоната стронция с поверхности расплава алюминия на глубину 0,25 м) составит  $-0,98$  кДж/моль, а при повышении давления с 119,42 до 125,45 кПа (погружение карбоната стронция с глубины 0,75 до 1,0 м) – соответственно  $-0,73$  кДж/моль. Для температуры 1173 К разность между изменениями изобарно-изотермического потенциала при повышении давления в рассматриваемой системе с 101,33 до 107,15 кПа (погружение карбоната стронция с поверхности расплава алюминия на глубину 0,25 м) составит  $-1,18$  кДж/моль, а при повышении давления с 118,80 до 124,62 кПа (погружение карбоната стронция с глубины 0,75 до 1,0 м) соответственно  $-0,88$  кДж/моль. Разность изменений изобарно-изотермического потенциала системы при погружении карбоната стронция с поверхности расплава алюминия на глубину 1,0 м для 943 и 1173 К составит соответственно  $-3,39$  и  $-4,08$  кДж/моль.

Аналогично, для давления 101,33 кПа (на зеркале расплава) разность между изменениями энергии Гиббса при увеличении температуры рассматриваемой системы с 943 до 993 К составит 13,86 кДж/моль, а при увеличении температуры с 1123 до 1173 К – соответственно 14,30 кДж/моль. Для глубины погружения 1,0 м разность изменений изобарно-изотермического потенциала при увеличении температуры рассматриваемой системы с 943 до 993 К составит 13,70 кДж/моль, а при увеличении температуры с 1123 до 1173 К соответственно 14,15 кДж/моль. Общая разность изменений изобарно-изотермического потенциала системы при увеличении температуры с 943 до 1173 К на зеркале расплава и на глубине 1,0 м составит соответственно 64,92 и 64,23 кДж/моль.

Необходимо отметить, что реакция взаимодействия карбоната стронция с кремнием в жидком силумине  $\text{SrCO}_3 + \text{Si} \rightarrow \text{Sr} + \text{SiO}_2 + \text{CO}$  в диапазоне температур 943–1163 К

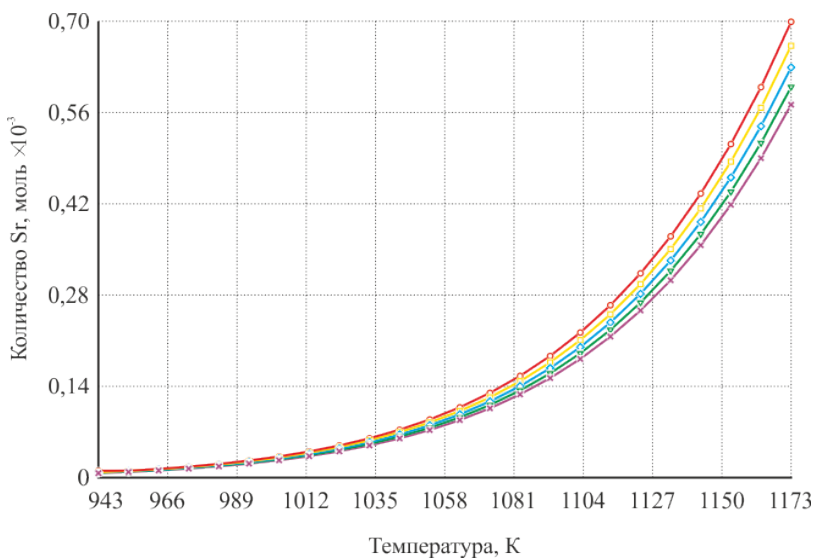
при давлениях, соответствующих глубине погружения  $\text{SrCO}_3$  в расплав от 0 до 1,0 м сопровождается увеличением изменения энергии Гиббса (рисунок 5), что говорит о нецелесообразности рассматривания Si в качестве восстановителя стронция из его карбоната для модифицирования эвтектического кремния в производственных условиях.



Примечания: —○— 0 м; —□— 0,25 м; —◇— 0,5 м; —▽— 0,75 м; —×— 1 м.

**Рисунок 5 – Зависимость изменения энергии Гиббса реакции  $\text{SrCO}_3 + \text{Si} \rightarrow \text{Sr} + \text{SiO}_2 + \text{CO}$  от температуры при различной глубине погружения навески карбоната стронция в расплав алюминия**

Анализ зависимости молярных концентраций фаз  $\text{SrCO}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  от температуры при различных давлениях в системе  $\text{SrCO}_3\text{-Al-Sr-Al}_2\text{O}_3\text{-CO-CO}_2$ , представлен на рисунке 6.



Пояснения: —○— 0 м; —□— 0,25 м; —◇— 0,5 м; —▽— 0,75 м; —×— 1 м.

**Рисунок 6 – Зависимость количества выделяющегося Sr при равновесии реакции  $2\text{SrCO}_3 + 2\text{Al} \rightarrow 2\text{Sr} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CO} + \text{CO}_2$  от температуры на различной глубине в расплаве алюминия**



Анализируя графические данные (рисунок 6) можно сделать вывод о незначительном влиянии температуры и давления в исследуемом диапазоне на скорость протекания реакции взаимодействия карбоната стронция с жидким алюминием. С увеличением температуры расплава с 943 до 1173 К и уменьшением глубины погружения колокольчика с  $\text{SrCO}_3$  в жидкий силумин с 1,0 до 0 м отмечается плавная интенсификация реакции  $2\text{SrCO}_3 + 2\text{Al} \rightarrow 2\text{Sr} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CO} + \text{CO}_2$ .

**Заключение.** Полученные экспериментальные данные подтверждают выдвинутое предположение о возможности проведения в производственных условиях модифицирующей обработки силуминов карбонатом стронция.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Неменёнок, Б. М.* Теория и практика комплексного модифицирования силуминов : монография / Б. М. Неменёнок. – Минск : Технопринт, 1999. – 270 с.
2. Модифицирование силуминов стронцием / И. Н. Ганиев [и др.] ; под ред. К. В. Горева. – Минск : Наука и техника, 1985. – 143 с.
3. *Храмченков, А. И.* Применение модификаторов длительного действия при производстве отливок из сплава АЛ4 / А. И. Храмченков [и др.] // Литейное производство. – 1984. – № 6. – С. 11–13.
4. *Храмченков, А. И.* Обработка алюминиевых сплавов модификаторами длительного действия / А. И. Храмченков [и др.] // Технология автомобилестроения. – 1982. – № 8. – С. 11–13.
5. *Андрушевич, А. А.* Модифицирование алюминиево-кремниевых сплавов стронцием / А. А. Андрушевич, М. З. Лубенский, Г. П. Пименова // Литейное производство. – 1983. – № 10. – С. 9–10.
6. *Ершов, Г. С.* Высокопрочные алюминиевые сплавы на основе вторичного сырья / Г. С. Ершов, Ю. Б. Бычков. – М. : Metallurgia, 1979. – 192 с.
7. *Motoyuki, N.* Пути улучшения структуры и свойств алюминиевых сплавов / N. Motoyuki, A. Yoji, Ya. Ikuhiro // J. Jap. Foundrymen's Soc. – 1989. – Vol. 61, No. 5. – P. 334–342.
8. *Куприянова, И. Ю.* Модифицирующее влияние добавок сурьмы на структуру и свойства силуминов / И. Ю. Куприянова, П. А. Пархутик, Е. Н. Савицкая // Metallurgia. – Минск : Вышш. шк., 1988. – Вып. 22. – С. 22–27.
9. *Курдюмов, А. В.* Металлические примеси в алюминиевых сплавах: Проблемы цветной металлургии / А. В. Курдюмов [и др.] – М. : Metallurgia, 1988. – 143 с.
10. *Brunhuber, E.* Kurz und Langzeit Veredelung von Aluminium-Silicium-Gußlegierungen / E. Brunhuber // Giesserei-Praxis. – 1981. – № 4. – P. 61–66.
11. *Handiak, N.* Wechselwirkungen zwischen Natrium, Strontium und Antimon bei der Veredelung von G-AlSi7Mg-Legierungen / N. Handiak, J. E. Gruzleski, D. Argo // Giesserei-Praxis. – 1989. – № 3. – P. 25–33.
12. *Ганиев, И. Н.* Модифицирование силуминов стронцием / И. Н. Ганиев [и др.]. – Минск : Наука и техника, 1985. – 143 с.
13. Флюс для обработки алюминиевых сплавов : а. с. 572512 СССР, МКИ С22 В 9/10 / А. В. Суздальцев, М. Д. Молчанов, Н. А. Сухорукова, В. А. Шеламов, А. И. Орехов. – Оpubл. 15.09.1977.
14. Флюс для обработки алюминиевых сплавов : а. с. 986948 СССР, МКИ С22 В 9/10 / А. А. Андрушевич, Д. А. Волков, Г. М. Пронина, И. А. Храмченков. – Оpubл. 07.01.1983.
15. Универсальный флюс для обработки алюминиево-кремниевых сплавов : а. с. 616316 СССР, МКИ С22 В 9/10 / В. С. Гребенкин. – Оpubл. 25.07.1978.
16. Состав для обработки сплавов алюминия с кремнием : а. с. 618432 СССР, МКИ С22 В 9/10 / В. П. Ефименко, В. М. Гудкевич, Е. Ф. Горелов, О. П. Микуляк. – Оpubл. 05.08.1978.
17. *Zadruckij, S. P.* Problemy ekologii pri modifirovanii siluminov / S. P. Zadruckij, B. M. Nemenenok // Technologia'97. – Bratislava, 1997. – P. 414–417.
18. *Неменёнок, Б. М.* Разработка низкотоксичных универсальных флюсов для обработки силуминов / Б. М. Неменёнок, С. П. Задруцкий, Т. А. Ковальчук // Состояние и перспективы развития науки и подготовки инженеров высокой квалификации в Белорусской государственной политехнической академии : тезисы докл. науч. конф., Минск, 21 нояб. 1995 г. / Белорусская государственная политехническая академия ; редкол.: Б. М. Хрусталёв [и др.]. – Минск : БГПА, 1995. – С. 20–21.
19. *Задруцкий, С. П.* Низкотоксичные способы обработки силуминов / С. П. Задруцкий, Б. М. Неменёнок // Metallurgia и литейное производство / под ред. Д. М. Кукуя. – Минск : Белорганкипромиздат, 1997. – С. 51–53.

## Thermodynamics modification of silumin by strontium carbonate

B. M. Nemenenok<sup>1</sup>, S. P. Zadrutski<sup>2</sup>, G. V. Dovnar<sup>3</sup>, A. A. Pivovarchik<sup>4</sup>, A. S. Panasiugin<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Belarusian National Technical University (Belarus)

Nezavisimosti Ave., 65, 220013, Minsk, Belarus; e-mail: nemenenok@tut.by

<sup>2</sup> Belarusian National Technical University (Belarus)

Nezavisimosti Ave., 65, 220013, Minsk, Belarus; e-mail: zadrutskij@bntu.by

<sup>3</sup> Belarusian National Technical University (Belarus)

Nezavisimosti Ave., 65, 220013, Minsk, Belarus; e-mail: gv dov nar@bntu.by

<sup>4</sup> Yanka Kupala State University of Grodno (Belarus)

Ozheshko St., 22, 230023, Grodno, Belarus; e-mail: Pivovarchik\_AA@grsu.by

<sup>5</sup> Belarusian National Technical University (Belarus)

Nezavisimosti Ave., 65, 220013, Minsk, Belarus; e-mail: niilogaz@tut.by

**Abstract.** The aim of this research is to carry out the investigation to determine the probability of chemical and phase transformations in the system SrSO<sub>3</sub>-Al-Si using the method of thermodynamic modeling. The scientific novelty of this work is to obtain new experimental data to determine the probability of chemical and phase transformations in the system SrSO<sub>3</sub>-Al-Si under real production conditions at different temperature ranges and pressures. In the introduction it is shown the theoretical information on the materials used in the modification of the aluminum melt. It is described the advantages and disadvantages of using such enhancing materials as sodium, antimony and strontium. In the main part of the paper it is analyzed the methodology for carrying out studies to determine the possible chemical and phase transformations in the system SrSO<sub>3</sub>-Al-Si using the method of computer modeling by means of HSC Chemistry software. The results of the thermodynamic analysis of the probability of phase transitions in the investigated range of temperatures and pressures are represented. It is found that with the increase in the melt temperature from 943 K to 1173 K and the decrease in the depth of the dive plunger with SrCO<sub>3</sub> in liquid silumin with 1.0 m to metal mirror it is noted smooth intensification of reaction  $2\text{SrCO}_3 + 2\text{Al} \rightarrow 2\text{Sr} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CO} + \text{CO}_2$ . The obtained results will be useful for technologies in the choice of materials that are used as refining and modifying additives in the melting of aluminum alloys, as well as the melting of ingots of aluminum scrap lump.

**Keywords:** silumin, modifying effect, melt, strontium carbonate, plunger, ligature, thermodynamic analysis, Gibbs energy.

## References

1. Nemenenok B. M. Theory and practice of complex modification of silumins [*Teoriia i praktika kompleksnogo modifitsirovaniia siluminov : monografiia*]. Minsk, 1999, 270 p.
2. Ganiev I. N. [et al.]. Modification of silumins by strontium [*Modifitsirovanie siluminov strontsiem*]; Ed. K. V. Goraev. Minsk, 1985, 143 p.
3. Khranchenkov A. I. [et al.]. The use of long-acting modifiers in the production of castings made of alloy AL4 [*Primenenie modifikatorov dlitel'nogo deistviia pri proizvodstve otlivok iz splava AL4*]. *Liteinoe proizvodstvo*, 1984, No. 6, pp. 11-13.
4. Khranchenkov A. I. [et al.]. Processing of aluminum alloys by long-acting modifiers [*Obrabotka aluminievyykh splavov modifikatorami dlitel'nogo deistviia*]. *Technology of the automotive*, 1982, No. 8, pp. 11-13.
5. Andrushevich A. A., Lubenski M. Z., Pimenova G. P. Modification of aluminum-silicon alloys by strontium [*Modifitsirovanie aluminievo-kremnievyykh splavov strontsiem*]. *Liteinoe proizvodstvo*, 1983, No. 10, pp. 9-10.
6. Ershov G. S., Bychkov Yu. B. High-strength aluminum alloys based on secondary raw materials [*Vysokoprochnyye aluminievye splavy na osnove vtorignogo syr'ia*]. Moscow, 1979, 192 p.
7. Motoyuki N., Yoji A., Ikuhiro Ya. Ways to improve the structure and properties of aluminum alloys [*Puti uluchsheniia struktury i svoistv aluminievyykh splavov*]. *J. Jap. Foundrymen's Soc.*, 1989, vol. 61, No. 5, pp. 334-342.
8. Kupriyanova I. Yu., Parkhutik P. A., Savitskaya E. N. Modifying influence of antimony addition on silumin structure and properties [*Modifitsirovaniie vliianie dobavok sur'my na strukturu i svoistva siluminov*]. *Metallurgy [Metallurgii]*. Minsk, 1988, issue 22, pp. 22-27.



9. Kurdiymov A. V. [et al.]. Metallic impurities in aluminum alloys: Problems of non-ferrous metallurgy [*Metallicheskie primesi v aluminievyykh splavakh: Problemy tsvetnoi metallurgii*]. Moscow, 1988, 143 p.
10. Brunhuber E. Short and long-term improvement of aluminum-silicon-foundry alloy [*Kurz und Langzeit Veredelung von Aluminium-Silicium-Gußlegierungen*]. *Giesserei-Praxis*, 1981, No. 4, pp. 61-66.
11. Handiak N., Gruzleski J. E., Argo D. Interactions between sodium, strontium and antimony in the refining of G-AlSi7Mg alloys [*Wechselwirkungen zwischen Natrium, Strontium und Antimon bei der Veredelung von G-AlSi7Mg-Legierungen*]. *Giesserei-Praxis*, 1989, No. 3, pp. 25-33.
12. Ganiev I. N. [et al.]. Modification of silumins by strontium [*Modifitsirovanie siluminov strontsiem*]. Minsk, 1985, 143 p.
13. Suzdaltsev A. V., Molchanov M. D., Sukhorukova N. A., Shelamov V. A., Orekhov A. I. Flux for processing of aluminum alloys [*Flius dlia obrabotki aluminievyykh splavov*] : a. s. 572512 SSSR, *MKI S22 V 9/10*. Publ. 15.09.1977.
14. Andrushevich A. A., Volkov D. A., Pronina G. M., Khramchenkov I. A. Flux for processing of aluminum alloys [*Flius dlia obrabotki aluminievyykh splavov*] : a. s. 986948 SSSR, *MKI S22 V 9/10*. Publ. 07.01.1983.
15. Grebenkin V. S. Universal flux for processing of aluminum-silicon alloys [*Universal'nyi flius dlia obrabotki aluminievo-kremnievyykh splavov*] : a. s. 616316 SSSR, *MKI S22 V 9/10*. Publ. 25.07.1978.
16. Efimenko V. P., Gudkevich V. M., Gorelov E. F., Mikuliak O. P. The composition for processing of aluminum alloys with silicon [*Sostav dlia obrabotki splavov aluminia s kremniem*] : a. s. 618432 SSSR, *MKI S22 V 9/10*. Publ. 05.08.1978.
17. Zadruckij S. P., Nemenenok B. M. Problemy ekologii pri modifirovanii siluminov. *Tehnologija '97*. Bratislava, 1997, pp. 414-417.
18. Nemenenok B. M., Zadrutski S. P., Kovalchuk T. A. The development of low toxicity universal flux for processing of silumins [*Razrabotka nizkotoksichnykh universal'nykh fliusov dlia obrabotki siluminov*]. *State and prospects of development of science and the training of engineers of high qualification in the Belarusian State Polytechnic Academy: abstracts of reports of scientific conf.*, Minsk, Nov. 21, 1995; ed. board: B. M. Khrustalev [et al.]. Minsk, 1995, pp. 20-21.
19. Zadrutski S. P., Nemenenok B. M. Low-toxic ways of silumins processing [*Nizkotoksichnye sposoby obrabotki siluminov*]. *Metallurgy and casting production [Metallurgiya i liteinoe proizvodstvo]*; Ed. D. M. Kukui. Minsk, 1997, pp. 51-53.



*Уважаемые авторы!*

*Более подробно требования к оформлению материалов, а также условия для  
принятия материалов см. на сайте журнала*

<http://vesnik.grsu.by>