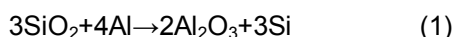


ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПОЛУЧЕНИЯ СИЛУМИНОВ СПОСОБОМ ПРЯМОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ КРЕМНИЯ ИЗ АЛЮМОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИЦИЙ

А. В. Арабей, И. В. Рафальский

Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Белоруссия

Разработка новых ресурсосберегающих способов и технологий получения сплавов системы алюминий-кремний представляет собой важную и актуальную задачу литейного производства. Значительный научный и практический интерес связан с исследованиями процесса синтеза силуминов методом прямого восстановления кремния из его оксидов алюминием вследствие протекания химической реакции между расплавленным алюминием и частицами кремнезема:



Практическая реализация литейной технологии прямого восстановления требует решения проблемных вопросов, связанных с особенностями ввода несмачиваемых частиц оксидов кремния в расплав алюминий.

Ввод в сплавы на основе алюминия дисперсных, не смачиваемых расплавом материалов, осуществляют в настоящее время различными методами: интенсивным механическим замешиванием (вортекс-процесс), вводом частиц наполнителя в расплав с помощью плазменной струи инертного газа, введением в расплав спеченных или брикетированных материалов и др. Однако существующие способы ввода дисперсных частиц в расплавы обладают рядом определенных недостатков, требуют дорогостоящего специального оборудования и значительно усложняют технологический процесс.

В настоящей работе исследованы основные закономерности процесса восстановления кремния с использованием алюмоматричных композиционных лигатур (АКЛ).

АКЛ получали путем введения кварцевого песка марки $2\text{K}_2\text{O}_2\text{O}_3$ со средним размером зерна 0,3 мм в расплав алюминия технической чистоты марки А7 с последующим замешиванием в опытно-экспериментальной установке в жидко-твердом состоянии элек-

тромаксером со скоростью вращения импеллера 100 об/мин.

На первом этапе работы было изучено влияние температурно-временной обработки матричного расплава до ввода частиц кварцевого песка на содержание кремния в алюминии. Содержание кремния в процессе проведения экспериментальных опытов оценивали по изменению температуры ликвидус сплава, определяемой методом термического анализа.

Анализ полученных результатов показал, что процесс взаимодействия частиц кремнезема с расплавом алюминия характеризуется значительным разбросом значений содержания кремния в интервале температур матричного расплава 700-1100 °С до ввода наполнителя – от 0,2 до 9,7 % (масс.).

Сравнительная оценка силы влияния исследуемого фактора – температуры матричного расплава алюминия – на результативный признак (выход кремния) проводилась методом дисперсионного анализа. Показатель силы влияния η^2 исследованного фактора – температуры матричного расплава алюминия – на выход кремния определялся долей факториальной дисперсии в общей дисперсии. Определение достоверности результатов анализа проводили с использованием F -критерия.

Обработка результатов дисперсионного анализа показала, что влияние температуры перегрева (температурной предыстории) матричного расплава алюминия на выход кремния является незначительным: $\eta^2=18,1\%$, расчетное значение F -критерия ($F=2,07$) меньше критического ($F_{st}=2,36$) при принятом уровне значимости $\alpha=0,05$, поэтому гипотезу о незначительности влияния температуры перегрева матричного расплава алюминия на выход кремния отвергать нельзя.

На следующем этапе изучали влияние температуры перегрева полученной АКЛ на

выход кремния. Полученную на основе кварцевого песка и алюминия АКЛ нагревали до заданных температур, выдерживали 45 мин., обрабатывали рафинирующим флюсом и сливали расплав для анализа.

Группирование экспериментальных данных для проведения дисперсионного анализа влияние температуры перегрева полученной АКЛ на выход кремния проводилось в соответствии с температурными интервалами до 800, 800-900, 900-1000 и свыше 1000 °С.

Согласно результатам дисперсионного анализа, температура перегрева АКЛ существенно влияет на результирующий признак ($\eta^2=52,5\%$). Так как значение вычисленного F -критерия (7,37) больше критического (2,77), принятого для уровня значимости $\alpha=0,05$, гипотезу о значительности влияния исследованного фактора отвергать нельзя.

На следующем этапе работы проведено исследование зависимости между температурно-временными параметрами приготовления сплава из АКЛ, количеством вводимого кремнезема и выходом кремния с использованием метода регрессионного анализа.

Для исключения возможности появления систематической ошибки, являющейся следствием совместного влияния независимых переменных на функцию отклика, регрессионный анализ проводился для системы с одним входом по данным спланированных экспериментов при зафиксированных значениях остальных факторов в случайной последовательности. Для компенсации влияния случайных погрешностей каждый опыт повторяли несколько раз.

На первом этапе обработки экспериментальных данных проводили поиск и исключение грубых погрешностей (брак при повторных опытах) на основе критерия Н.В. Смирнова. С целью оценки отклонений параметра оптимизации от его среднего значения вычисляли дисперсию s_j^2 по данным четырех параллельных опытов и ошибку s_j . Одно-

родность ряда дисперсий в каждом эксперименте проверяли по критерию Кохрена. Расчетные значения G -критерия для полученных экспериментальных данных влияния температуры приготовления сплава, времени выдержки и количества вводимого в АКЛ кремнезема на выход кремния соответственно составляют 0.19, 0.44, 0.52 и меньше критических значений, принятых для уровня значимости 95 % ($\alpha=0,05$).

На следующем этапе анализа проводили выбор типа математической модели. Выбор типа модели осуществлялся на основе расчетных значений коэффициента линейной парной корреляции (R) между входным и выходным параметрами. Расчет значений R для моделей нелинейного типа проводили после преобразования модели к линейному виду. Адекватность модели проверяли с помощью F -критерия.

Анализ зависимостей проводили с использованием полиномиальных моделей второго и более высокого порядков (таблицы 1, 2). Выбор наилучшего уравнения регрессии осуществлялся шаговым регрессионным методом с использованием критерия R (коэффициент множественной корреляции) – путем включения в уравнение регрессии аддитивных членов до тех пор, пока уравнение не станет удовлетворительным.

Согласно полученным результатам, влияние времени и содержания кремнезема в АКЛ на выход кремния в результате реакции восстановления алюминием из кремнезема может быть описано полиномами второго порядка (таблица 1), а влияние температуры – полиномом пятого порядка (таблица 2). Коэффициенты множественной корреляции между предикторами и откликом моделей близки к единице, что свидетельствует о наличии сильной связи, при этом значения критерия Фишера не превышают критических для выбранного уровня значимости 95 % ($\alpha=0,05$).

Таблица 1 – Значения F - и R -критериев для полиномиальных моделей влияния времени и содержания кремнезема в АКЛ на выход кремния

Вид модели	%Si = F(τ)			%Si = F(%SiO ₂)		
	R	F расч.	F табл.	R	F расч.	F табл.
$y = b_0 + b_1 \cdot x + b_2 \cdot x^2$	0,99	0,5	4,8	0,98	2,8	3,16

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПОЛУЧЕНИЯ СИЛУМИНОВ СПОСОБОМ ПРЯМОГО
ВОССТАНОВЛЕНИЯ КРЕМНИЯ ИЗ АЛЮМОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИЦИЙ

Таблица 2 – Значения F- и R-критериев для полиномиальных моделей влияния температуры на выход кремния

№ п/п	Вид модели	%Si = F(T)		
		R	F расч.	F табл.
1	$y = b_0 + b_1 \cdot x + b_2 \cdot x^2$	0,79	11,7	2,6
2	$y = b_0 + b_1 \cdot x + b_2 \cdot x^2 + b_3 \cdot x^3$	0,90	7,2	2,8
3	$y = b_0 + b_1 \cdot x + b_2 \cdot x^2 + b_3 \cdot x^3 + b_4 \cdot x^4$	0,94	6,5	3
4	$y = b_0 + b_1 \cdot x + b_2 \cdot x^2 + b_3 \cdot x^3 + b_4 \cdot x^4 + b_5 \cdot x^5$	0,98	3,2	3,4

Таким образом, на основе экспериментальных данных, полученных с использованием термического анализа синтетических силуминов из АКЛ получены математические модели, адекватно описывающие влияние температуры, времени приготовления сплава и количества кремнезема в АКЛ на выход кремния в сплаве:

1. математическая модель выхода кремния как функция от времени приготовления сплава из АКЛ:

$$Si, \% = 2,56875 + 0,2525625 \cdot \tau - 0,00273 \cdot \tau^2 \quad (1)$$

2. математическая модель выхода кремния как функция от температуры приготовления сплава из АКЛ:

$$Si, \% = -75049,4906 + 416,0198536 \cdot T - 0,918878226 \cdot T^2 + 0,0010109 \cdot T^3 - 5,53906 \cdot 10^{-7} \cdot T^4 + 1,2091 \cdot 10^{-10} \cdot T^5 \quad (2)$$

3. математическая модель выхода кремния как функция от количества вводимого в АКЛ кремнезема:

$$Si, \% = -10,8110714 + 1,35567857 \cdot C_{SiO_2} - 0,01961 \cdot C_{SiO_2}^2 \quad (3)$$

Установленные закономерности синтеза сплавов системы алюминий-кремний из АКЛ позволили разработать технические решения получения синтетических силуминов без использования кристаллического кремния в шихте.