

УДК 621.742.486

*Сафронов Н.Н., доктор технических наук, профессор, Набережночелнинский институт ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет» safronov-45@mail.ru*

*Харисов Л.Р., кандидат технических наук, доцент, Набережночелнинский институт ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет» ln271@mail.ru*

## ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ШИХТЫ

### НА СВЯЗУЮЩИЕ СВОЙСТВА ШЛАКА СВС-ПРОЦЕССА

*Аннотация. В статье исследуются закономерности процесса шлакообразования в результате протекания СВС-процесса. В работе выявлены факторы, влияющие на прочность получаемого цемента, составлен план дробного факторного эксперимента, проведен статистический анализ полученных экспериментальных данных и получена математическая модель зависимости прочности материала от состава шихты СВС-процесса.*

*Ключевые слова. СВС-процесс; ферросилид; глиноземистый цемент; отходы; окалина; стружка; прочность; планируемый эксперимент; уравнение регрессии.*

При получении СВС-ферросилида из дисперсных отходов машиностроения [1] восстановителем железа в кузнечной окалине являлся алюминий, оксид которого представляет собой достаточно тугоплавкое вещество (температура плавления равна  $2046 \pm 20^\circ\text{C}$  [2]). С целью снижения температуры плавления шлаковой фазы в шихту процесса СВС вводили флюсующую добавку в виде порошкообразной извести в количестве 35-65% по отношению к кузнечной окалине. В связи с такой особенностью формирования шлаковой фазы следует ожидать в ней присутствие высокоосновных алюминатов кальция, которые могут стать причиной наличия у шлака вяжущих свойств, аналогичных глинозёмистому цементу. Последний материал – гидравлическое вяжущее вещество с малыми сроками схватывания и твердения, обеспечивающее получение цементного камня высокой прочности [3].

Глиноземистый цемент благодаря ряду уникальных свойств нашёл

широкое применение. Бетоны на глиноземистом цементе являются морозостойкими. Они по сравнению с портландцементом обладают более высокой стойкостью против выщелачивающей коррозии, а также к растворам сульфата кальция и магния, морской и болотной воде, растворам сахара, животным и растительным маслам. Глиноземистый цемент может быть использован для формования мелких блоков при строительстве каменных зданий. При этом твердение блоков не требует тепловой обработки, что делает их производство экономичным. Глиноземистый цемент применяют при возведении бетонных конструкций в условиях производства срочных аварийных и ремонтных работ, а также для тампонирования нефтяных и газовых скважин, футеровки шахтных колодцев и туннелей.

В литейном производстве глиноземистый цемент в смеси с жаростойкими заполнителями находит применение как высокотемпературный сырьевой материал для производства футеровочных работ, а также для изготовления формовочных цементных смесей.

Несмотря на уникальные свойства производство глиноземистого цемента по сравнению с портландцементом невелико. Его доля в общем выпуске цемента не превышает 1%. Это обстоятельство обусловлено высокой стоимостью глиноземистого цемента, которая в несколько раз превышает аналогичный показатель для портландцемента. Причинами высокой стоимости глиноземистого цемента являются особенности сырьевой базы и технологии производства.

Предложенная нами технология получения СВС-ферросилида [1] позволяет получать, кроме отмеченного продукта, шлак как аналог глиноземистого цемента. Эта технология выгодно отличается от традиционного способа производства глиноземистого цемента, в силу чего себестоимость последнего резко снижается. По оценке авторов работы [4], которые также использовали процесс СВС, это снижение равно двум порядкам при получении плавленной легированной шпинели.

В настоящей работе приводятся результаты исследования вяжущих

свойств шлака – продукта процесса получения СВС-ферросилида. Шихта указанного процесса состояла из кузнечной окалины, силуминовой и графитовой стружки, порошкообразной извести и аммиачной селитры.

В качестве выходного параметра ( $y$ ) оценки вязущих свойств шлаковой фазы использовался предел прочности на сжатие образцов (МПа).

Входными контролируемыми факторами являлись параметры, характеризующие состав шихты процесса СВС. В качестве базы, по отношению к которой варьировались количества компонентов шихты, принималась кузнечная окалина Литейного завода ОАО «КамАЗ». Во всех вариантах шихты количество силуминовой стружки АК18 поддерживалось на уровне 40%. Исследовалось влияние следующих факторов:

$x_1$  – количество смеси алюминиевой стружки и аммиачной селитры в относительном массовом соотношении между собой 1:3,5;

$x_2$  – количество графитовой стружки;

$x_3$  – количество порошкообразной извести.

Исследование влияния состава шихты на величину выходного параметра осуществлялось с использованием метода планируемого эксперимента [5]. Целью исследования являлась определение линейной аппроксимации функции отклика в заданной области изменения факторов. В связи с этим для построения указанной математической модели был использован дробный факторный эксперимент  $2^{3-1}$  для трёх входных факторов и трех параллельных наблюдений при генерирующем соотношении  $x_3 = x_1 \cdot x_2$ . В таблице 1 представлены кодированные и именованные значения входных контролируемых факторов ( $x_1, x_2, x_3$ ), а в таблице 2 дробный факторный план, реализация которого позволит получить математическую модель следующего вида:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 \quad (1)$$

Таблица 1.

Кодированные\* и именованные значения  
входных контролируемых факторов

Смесь алюминиевой стружки и аммиачной селитры ( $x_1$ )	кодированное	-1	0	+1
	именованное	50 %	75 %	100 %
Графитовая стружка ( $x_2$ )	кодированное	-1	0	+1
	именованное	0,5 %	0,8 %	1,1 %
Порошкообразная известь ( $x_3$ )	кодированное	-1	0	+1
	именованное	35 %	50 %	65 %

\* Кодирование входных контролируемых факторов производилось с помощью формулы преобразования:

Таблица 2.

План эксперимента

№ опыта	$x_0$	Планирование			Выходной параметр	
		$x_1$	$x_2$	$x_3$	$y$	$y_{cp}$
1	+	+	+	+	49	50,67
					51	
					52	
2	+	—	+	—	46	47,67
					48	
					49	
3	+	+	—	—	55	56
					56	
					57	
4	+	—	—	+	39	40,33
					40	
					42	

$$x_i = \frac{x_{ui} - x_{0i}}{\varepsilon_i}, \quad (2)$$

где  $x_i$  – кодированное значение фактора;

$x_{ui}$  – значение фактора в именованных (натуральных) единицах;

$x_{0i}$  – значение нулевого уровня в именованных единицах;

$\varepsilon_i$  – интервал варьирования в именованных единицах.

Расчет свободного члена и линейных коэффициентов уравнения регрессии (1) дал следующие результаты:  $a_0 = 48,67$ ;  $a_1 = 4,67$ ;  $a_2 = 0,5$ ;  $a_3 = -3,17$ . Таким образом обсуждаемое уравнение регрессии приобретает следующий вид:

$$y = 48,67 + 4,67x_1 + 0,5x_2 - 3,17x_3. \quad (3)$$

Полученная математическая модель имеет смысл в том случае, если имеет место значимость различия максимального и минимального среднего значения выходного параметра в отдельных опытах. Проведём анализ на этот предмет. Среднеквадратичное отклонение значения выходного параметра равно 1,53 (опыты 1, 2, 4) и 1 (опыт 3). Экспериментальное значение  $t$ -критерия (критерий Стьюдента) равно  $t_{эк} = 8,58$ . Табличное значение критерия Стьюдента для числа степеней свободы  $f = 4$  и надежности  $\alpha = 0,95$  равно  $t_\alpha = 2,78$ . Оно меньше, чем экспериментальное значение. Поэтому построение математической модели (3) является обоснованным.

Использование результатов экспериментальных исследований для аппроксимации функции отклика полиномом возможно в случае, когда дисперсии измерения функции отклика в каждой точке опыта одинаковы. Поэтому проверим однородность построчных дисперсий по критерию Кохрана. С этой целью произведём расчёт его значения.  $G_{расч} = 0,292$ . Табличное значение критерия Кохрана для числа опытов  $N = 4$ , степеней свободы  $f = 2$  и надежности  $\alpha = 0,95$  равно  $G = 0,768$ . Оно больше, чем расчётное значение. Следовательно, построчные дисперсии однородны. Дисперсия воспроизводимости выходного параметра равна средней дисперсии  $S_y^2 = 2,00$ .

Проверим значимость коэффициентов регрессии уравнения (3). Для этого определим дисперсию коэффициентов регрессии:  $S_{ai}^2 = 0,25$  и рассчитаем

значение  $t$ -критерия:  $t_{0_{\text{ЭК}}} = \frac{48,67}{\sqrt{0,25}} = 97,33$ ,  $t_{1_{\text{ЭК}}} = \frac{4,673}{\sqrt{0,25}} = 9,33$ ;  $t_{2_{\text{ЭК}}} = \frac{0,5}{\sqrt{0,25}} = 1,00$ ;

$t_{3_{\text{ЭК}}} = \frac{3,17}{\sqrt{0,25}} = 6,33$ . Сравним рассчитанные значения  $t$ -критерия с табличным

значением  $t_{\alpha}$  для числа степеней свободы  $f_{ai}=8$  и надёжности  $\alpha=0,95$   $t_{\alpha} = 2,31$ .

Результат сравнения говорит о том, что коэффициенты уравнения (2, 3) ( $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_3$ ) значимы, так как для них  $t_{i_{\text{ЭК}}} > t_{\alpha}$ . Для коэффициента  $a_2$ :  $t_{2_{\text{ЭК}}} < t_{\alpha}$ . Поэтому

данный коэффициент считается статистически незначимым и соответствующее слагаемое в математической модели (2, 3) исключается. Уравнение регрессии (3) приобретает следующий вид:

$$y = 48,67 + 4,67x_1 - 3,17x_3. \quad (4)$$

Проверим данную математическую модель на гипотезу адекватности (пригодности) с помощью критерия Фишера. Расчётное значение этого

критерия равно:  $F_{\text{расч}} = \frac{S_{y_2}^2}{S_{ad}^2} = \frac{2,00}{0,60} = 3,33$ . Сравним полученное значение с

критическим (табличным) значением критерия Фишера. Оно выбирается из

таблицы исходя из надёжности  $\alpha = 0,95$ , числа степеней свободы для дисперсии

адекватности  $f_{ad} = 5$  и числа степеней свободы для выходного параметра  $f_y = 8$  ( $F$

$= 4,82$ ). Расчётное значение критерия Фишера меньше критического. Поэтому

уравнение (4) адекватно результатам наблюдений. Если в качестве аргументов в

уравнении (4) использовать именованные значения, то получим следующее

уравнение регрессии:

$$y = 45,22 + 0,19x_1 - 0,21x_3. \quad (5)$$

Таким образом, проведенное исследование позволяет сделать вывод о

том, что шлак процесса получения СВС-ферросилида в условиях варьирования

состава шихты (таблица 1) обладает вяжущими свойствами, уровень которых

соответствует маркам глиноземистого цемента 400, 500. Предел прочности на

сжатие после твердения в течение трёх суток определяется адекватными

уравнениями (4, 5). При этом себестоимость исследуемого вяжущего материала

на порядок ниже стандартного аналога.

#### Литература

1. Бикулов Р.А., Сафронов Г.Н., Харисов Л.Р. СВС-ферросилиды из дисперсных отходов машиностроения // Литейщик России. – 2010. - № 8. – С.15-17.
2. Рыжонков Д.И., Радерин С.Н., Серов Г.В., Жидкова Л.К. Расчёты металлургических процессов на ЭВМ: Учебное пособие для вузов. М.: Металлургия, 1987. – 231 с.
3. Пашенко А.А., Сербин В.П., Старчевская Е.А. Вяжущие материалы. - Киев: Высшая школа, 1975. – 443 с.
4. Перепелицин В.А., Рытвин В.М., Гильварг С.И., Игнатенко В.Г., Куталов В.Г., Арзамасцев Н.Н. Самораспадающийся феррохромовый алюминотермический шлак – полифункциональное техногенное сырьё // Новые огнеупоры. – 2009. - № 10. – С.9-14.
5. Новик Ф.С., Арсов Я.Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования эксперимента. – М.: Машиностроение; София: Техника, 1980. – 304 с.

---

*Safronov N.N., doctor of technical Sciences, full professor, Naberezhnye Chelny Institute of Kazan (Volga region) Federal University.*

*Kharisov L.R., candidate of technical Sciences, associated professor, Naberezhnye Chelny Institute of Kazan (Volga region) Federal University.*

#### INFLUENCE OF CHARGE TO SLAG BINDING PROPERTIES OF SHS PROCESS

*Abstract. the article investigates the process of slag formation resulting from the behavior of SHS process. This study reveals the factors affecting the strength of the product cement, the plan of fractional factorial experiment is made up, a statistical analysis of experimental data is carried out and mathematical model of dependence of the material strength on charge composition of the SHS process is obtained.*

*Keywords. SHS process, ferroalloy, aluminous cement, waste, scale, chips, strength, planned experiment, the regression equation.*