

УДК 621.745.3(075.32)

Ю.А. ЗИНЧЕНКО

## ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА ФУТЕРОВКИ ПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

*Рассматривается задача нахождения состава футеровки, обладающей максимальной стойкостью. Приведены результаты исследования свойств футеровки тигельных печей для выплавки чугуна. Проведено моделирование процесса приготовления смеси для футеровки, и определён её оптимальный состав. Даны рекомендации подбора материалов и технологии приготовления состава футеровки, обладающей максимальной стойкостью.*

**Ключевые слова:** футеровка, огнеупоры, связующие, термохимическая стойкость, планирование эксперимента, моделирование, оптимизация.

**Введение.** В индукционных тигельных плавильных печах вместимостью до 12 тонн жидкого металла используют футеровку из набивных масс, состоящих из зернистых огнеупорных материалов, связующих или минералогических добавок [1]. Материалы футеровки при высушивании и прокатке упрочняются – спекаются. В качестве связующих материалов чаще всего используют следующие материалы: борную кислоту ( $H_2BO_3$ ); борный ангидрид ( $B_2O_3$ ); сульфатное жидкое стекло ( $Na_2SiO_2 \cdot n H_2O$ ); плавиковый шпат ( $CaF_2$ ); хлористый кальций ( $CaCl_2$ ) и др. [2]. Количество связующих компонентов в составе огнеупорных масс обычно не превышает 5% от общего объёма. В некоторых составах футеровок количество связующих материалов может достигать 10% [2].

Футеровка печей делается многослойной, каждый слой футеровки имеет свой состав, и к каждому слою футеровки предъявляются определённые требования. Общее количество слоёв футеровки зависит от ёмкости тигля печи и вида сплава [1,4].

Для любой футеровки плавильной печи важнейшим показателем качества является не огнеупорность входящих в неё материалов, а её стойкость (срок службы) [3]. Правильно составленные и приготовленные гетерогенные футеровочные массы после спекания образуют футеровку с заданными физико-химическими свойствами. Общей рекомендацией здесь является необходимость получения максимальной плотности и прочности для исключения проникновения в поры футеровки расплавленного металла и шлака [3]. Последнее обстоятельство обеспечивает возможность получения футеровки с минимальной растворимостью расплавом и шлаком [4].

Анализ данных, изложенных в литературе [1,4], позволил сделать вывод, что авторы рекомендуют составы огнеупорного наполнителя в широком диапазоне размеров зёрен. Для плавильных печей вместимостью до одной тонны может быть рекомендован гранулометрический состав огнеупорного наполнителя внешнего слоя футеровки, представленный в табл.1.

Таблица 1

## Гранулометрический состав огнеупорного наполнителя

Песок	Размер зёрен	Количество, %	Форма зёрен	Газопроницаемость при оптимальной влажности, ед., не менее	Объёмная масса, кг/м <sup>3</sup>
Грубый	4,0...0,63 мм	5...15	Полуокруглая	900-800	1240
Очень Крупный	0,4...0,315мм	30...40	Полуокруглая	500-400	1460
Средний	0,2...0,16 мм	50...60	Полуокруглая	200-125	1630
Тонкий, пылевидный	0,1 и менее	2...7	Остроугольная	30 и менее	1850

Кроме рекомендаций гранулометрического состава, в настоящее время рекомендовано широкое разнообразие составов набивных масс футеровок, но их стойкость продолжает оставаться низкой. Работы по увеличению стойкости футеровки в основном направлены на поиски новых материалов с лучшими физико-химическими свойствами [4,5]. Такой путь, как правило, влечёт за собой увеличение стоимости футеровки.

Опыт эксплуатации печей на заводе «Конорд» (г. Ростов-на-Дону) показал, что срок службы чугуноплавильных печей определяется в основном стойкостью слоя футеровки, соприкасаемого с расплавом и шлаком. Толщина внешнего слоя постепенно уменьшается и после 12...15 плавов требует ремонта тигля (полной замены футеровки). Износ футеровки определяется активностью протекания химических реакций между материалами футеровки расплавом и шлаком. Анализ износа футеровки на этом предприятии показал, что повышенный износ средней и нижней зон определяется её повышенной растворимостью в расплаве (химической реакцией перехода кремния из футеровки в чугун). Разность диаметра рабочей зоны тигля в начале использования и перед ремонтом превышала 15%, что соответствовало уменьшению толщины внутреннего слоя футеровки более чем на 40...50%. Дальнейшая эксплуатация печи с таким износом футеровки не допускается.

Ремонт футеровки печи требует её остановки, охлаждения, выбивки тигля и замены всех его слоёв – это длительная и трудоёмкая операция. Поэтому возникла необходимость поиска технологических решений, обеспечивающих увеличение срока службы футеровки. Замена используемых огнеупорных материалов (кварцитов) на другие высокоогнеупорные материалы (хромит, магнезит, корунд и др.) увеличивает срок службы футеровки, однако резко повышает стоимость материалов. Поэтому задачей настоящего исследования были поиски путей увеличения стойкости футеровки без существенного увеличения затрат на производство и без замены используемых в данном производстве материалов.

**Постановка задачи исследования.** Основной задачей улучшения качества футеровки является поиск совершенствования технологии изготовле-

ния футеровки, обладающей повышенной устойчивостью к растворению расплавом и шлаком, что позволило бы увеличить продолжительность её эксплуатации (количество плавов до полного ремонта).

Стойкость тигля – комплексный показатель качества футеровки, который определяется рядом её физических и рабочих свойств:

- 1) пористость и плотность упаковки компонентов – объёмная масса, кгс/м<sup>3</sup>.
- 2) газопроницаемость – безразмерная величина;
- 3) тепловое линейное и объёмное расширение, %;
- 4) устойчивость к деформации футеровки под воздействием массы шихты при высоких температурах – способность противостоять одновременному воздействию высоких температур и массы шихты;
- 5) трещиностойкость – способность противостоять, не разрушаясь, резким изменениям температуры;
- 6) прочность – предел прочности при растяжении, сжатии, срезе, кгс/см<sup>2</sup>;
- 7) шлакостойкость – способность противостоять физическому и химическому воздействию расплавленного шлака;
- 8) поверхностная прочность – способность противостоять истиранию и ударам компонентов шихты;
- 9) химическая инертность – способность противостоять воздействию печной атмосферы.

Исследования макроструктуры темплетов (образцов из разных зон изношенной футеровки) под микроскопом (x50...100) показали, что повышенный износ футеровки обоснован проникновением жидкого расплава в её поры и, как следствие, её повышенная интенсивность растворения расплавом. Механизм образования микропор и трещин в футеровке имеет сложный характер и определяется многими факторами (качеством проведения ремонтных работ, интенсивностью проведения плавов, тепловой нагрузкой на печь, составом металлической шихты, режимами плавки и пр.) Для поиска технологических решений, направленных на повышение стойкости футеровки, был выбран метод исследования состава и макроструктуры футеровки как сложной гетерогенной системы. В первую очередь исследования были направлены на оценку газопроницаемости (плотности упаковки зёрен огнеупорного наполнителя футеровки) и анализ взаимовлияния компонентов на её прочностные и технологические свойства. Показателями прочности считали: прочность при разрыве; прочность при сжатии; поверхностная прочность (осыпаемость); трещиностойкость (снижение прочности при резком изменении температуры). Выбранные показатели прочности определяли разрушением образцов по стандартной методике на разрывной машине мод. 084M2. Прочность определяли при нормальной (25 ±5 °С) и повышенной (1000 ±5 °С) температурах.

Необходимый гранулометрический состав огнеупорного наполнителя составляли расчётным путём по известной методике соотношения размеров зёрен с целью наиболее плотной их упаковки [5]. Пористость наполнителя изменяли вводом мелкодисперсного наполнителя – маршалита. Тонкость помола маршалита контролировали рассевом - по величине остатка зёрен на сите с сеткой № 008 (5476 отв./см<sup>2</sup>). Указанный остаток зёрен составлял не более 10%, что соответствовало расчётным требованиям. Величина удельной поверхности зёрен маршалита при такой дис-

перстности находилась в пределах 280...320 см<sup>2</sup>/г [5]. Общую удельную поверхность наполнителя определяли расчётом для корректировки количества связующего.

Содержание связующего материала – борной кислоты изменяли в составе футеровочной массы в широких пределах. Недостаточное количество связующего материала приводило к снижению прочности, а избыточное – к снижению огнеупорности. Поиск оптимального количества связующего в составе футеровочной массы был очевиден.

Особое внимание уделяли вопросу эффективности распределения связующего в межзёрном пространстве в процессе перемешивания компонентов. Эффективность распределения связующего во многом зависит от технологии перемешивания компонентов и типа смесителя. Традиционно процесс приготовления футеровочной массы проводят в смесителях лопастного или каткового типов [1,2]. Было принято решение – проводить исследования для каждого типа смесителя отдельно с целью определения лучшего результата.

Очевидно, что намеченный путь исследований мог пояснить некоторые закономерности взаимовлияния компонентов на свойства футеровки, но интуитивный подход к решению задачи не мог дать желаемых результатов. Поэтому для достижения намеченной цели – определения оптимального состава и условий приготовления состава футеровки, обладающей максимальной стойкостью, был выбран метод математического моделирования с помощью планирования эксперимента [6].

В качестве функций отклика были выбраны следующие показатели свойств футеровки:

$Y_1-G_p$  – прочность при разрыве в прокалённом состоянии при температуре 1000<sup>0</sup>С, кгс/см<sup>2</sup>;

$Y_2-G_{cp}$  – прочность при срезе в прокалённом состоянии при температуре 1000<sup>0</sup>С, кгс/см<sup>2</sup>;

$Y_3-«Г»$  – газопроницаемость при температуре 25<sup>0</sup>С, ед. – безразмерная величина;

$Y_4-«П»$  – трещиностойкость – способность противостоять резкому изменению температуры, циклов.

Выбор показателя «Г»- (газопроницаемость) мог характеризовать плотность упаковки зёрен наполнителя и заполнения пор связующим после его оплавления. Этот показатель свойств футеровки легче контролировать известными методами и характеризовать объективными величинами. Тем более что этот показатель имеет тесную связь с другими важнейшими свойствами футеровки. При одинаковом гранулометрическом составе огнеупорного наполнителя физико-химические и прочностные свойства футеровки могут получаться совершенно разными.

Известно, что эффективность равномерного распределения связующего в межзёрном пространстве, исполняющего роль припоя при прокатке (образование мостиков связи), характеризуется, в частности, пористостью [5].

В качестве управляемых факторов были выбраны следующие показатели:

$X_1$  – содержание маршалита в общей массе наполнителя, %;

$X_2$  – содержание борной кислоты в общей массе футеровки, %;

$X_3$  – продолжительность перемешивания компонентов в смесителе, мин.

Для решения поставленной задачи был намечен и реализован план полного факторного эксперимента (ПФЭ), позволяющий получить полную квадратичную модель. Интервалы варьирования факторов и вид модели представлены в табл.2.

Таблица 2

Общие данные проведения испытаний

Фактор	Наименование	Ед.изм	Уровень-1	Уровень +1
$X_1$	Содержание маршалита	%	20	30
$X_2$	Содержание борной кислоты	%	1	5
$X_3$	Продолжительность перемешивания	Мин.	10	20
Отклик	Название	Ед. изм.		
$Y_1$	Прочность при разрыве	кгс/см <sup>2</sup>		
$Y_2$	Прочность при срезе	кгс/см <sup>2</sup>		
$Y_3$	Газопроницаемость	усл. ед.		
$Y_4$	Трещиностойчивость	Цикл		
Модель	$Y_i = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + B_3X_3 + B_{12}X_1X_2 + B_{13}X_1X_3 + B_{23}X_2X_3 + B_{11}X_1^2 + B_{22}X_2^2 + B_{33}X_3^2$ ;			
Тип плана	Полный факторный эксперимент (варьирование факторов на двух уровнях)			
Количество повторных опытов				три

Методики определения свойств футеровки требовали индивидуального подхода. Известные методы определения свойств огнеупорных материалов к решению поставленной задачи были непригодны. Последнее обстоятельство определено тем, что известные методы определения свойств огнеупоров используют для контроля качества готовых фасонных изделий, применяемых для футеровки плавильных печей большой ёмкости. Поэтому методики проведения испытаний разрабатывали исходя из поставленной задачи, а также имеющегося в лаборатории оборудования и оснастки.

**Проведение испытаний.** Для решения поставленной задачи был составлен и реализован план полного факторного эксперимента (ПФЭ), представленный в табл.3.

Таблица 3

Матрица планирования и результаты непосредственных измерений

№	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_1X_2$	$X_1X_3$	$X_2X_3$	$Y_{1\text{cp.}}$	$Y_{2\text{cp.}}$	$Y_{3\text{cp.}}$	$Y_{4\text{cp.}}$
1	1	1	1	1	1	1	1	8,2	2,2	22,7	7,7
2	1	-1	1	1	-1	-1	1	9,7	2,1	36	10,3
3	1	1	-1	1	-1	1	-1	3,3	1,76	24,6	4
4	1	-1	-1	1	1	-1	-1	3,13	1,56	38,3	3,3
5	1	-1	1	-1	-1	1	-1	9,93	1,5	38	8
6	1	1	-1	-1	-1	-1	1	3	1,2	32,6	5
7	1	1	1	-1	-1	-1	-1	7,1	1,7	22,3	7,3
8	1	-1	-1	-1	1	1	1	3,5	1,6	39	4,3

Сухие компоненты футеровочной массы по плану варьирования факторов загружали в катковый (первый вариант) или лопастной (второй вариант) смесители и перемешивали в установленный планом интервал

времени. Образцы для испытаний изготавливали в специальной оснастке методом уплотнения смеси на лабораторном копре (три удара падающего груза массой 6,35 кг) [3]. Изготовленные образцы имели различную форму для каждого вида испытаний: цилиндрические образцы (диаметр 50 мм, высота 50 мм) – для испытаний прочности при срезе, измерения газопроницаемости, измерения термической стойкости; образцы сложной формы (типа восьмёрки) – для испытания прочности при разрыве.

Изготовленные таким способом образцы подвергали спеканию в муфельной печи при температуре 1000-+5°C в течение одного часа. Прокалённые образцы извлекали из печи и проводили испытания «горячей» прочности при разрыве на приборе модели 084M2. Аналогично определяли «горячую» прочность при срезе на цилиндрических образцах.

Газопроницаемость определяли стандартной методикой на приборе модели M42, охлаждённых до комнатной температуры цилиндрических образцах, закреплённых в специальной оснастке.

Термическую стойкость определяли по оригинальной методике. Прокалённый цилиндрический образец после извлечения из печи устанавливали под струю атмосферного воздуха, создаваемую вентилятором. Обдув воздухом проводили до момента полного охлаждения образца до комнатной температуры. Охлаждённый образец вновь помещали в нагретую до 1000°C печь и по истечении 15-минутного нагрева подвергали охлаждению до комнатной температуры. Показателем термостойкости образца считали количество циклов нагрева и охлаждения (термошок) до появления первой трещины, которую обнаруживали визуально.

**Результаты эксперимента и их анализ.** В результате реализованного плана экспериментов (ПФЭ) были рассчитаны коэффициенты искомых откликов - уравнений регрессии [7]. Был проведён статистический анализ регрессионных моделей и коэффициентов в отдельности. Результаты представлены в табл.4.

Таблица 4

Результаты эксперимента

Коэффициенты для отклика «У <sub>1</sub> »		B <sub>0</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>12</sub>	B <sub>13</sub>	B <sub>23</sub>	B <sub>11</sub>	B <sub>22</sub>	B <sub>33</sub>
1		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Оценка значим.	Доверит. интервал ΔB <sub>i</sub> =0,16	1,70 0	0,012	0,170	0,200	0,060	0,060	0,072	0,012	0,017	0,020
		Значим	Не-знач.	Значим	Значим	Не-знач.	Не-знач.	Не-знач.	Не-знач.	Значим	Значим
Модель		$Y_1=1,7+0,17x_2+0,2x_3+0,17x_2^2+0,2x_3^2$					F <sub>расч</sub> =8,7	F <sub>табл</sub> =19,3 P=0,05		Модель адекватна!	
Коэффициенты для отклика «У <sub>2</sub> »		B <sub>0</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>12</sub>	B <sub>13</sub>	B <sub>23</sub>	B <sub>11</sub>	B <sub>22</sub>	B <sub>33</sub>
Оценка значим.	Доверит. интервал ΔB <sub>i</sub> =1,76	5,98 0	-0,58	2,750	0,100	0,500	0,250	0,110	0,580	2,750	0,100
		Значим	Не-знач.	Значим	Не-знач.	Не-знач.	Не-знач.	Не-знач.	Не-знач.	Знач.	Незнач.
Модель		$Y_2=5,98+2,75x_2+2,75x_2^2$					F <sub>расч</sub> =17,2	F <sub>табл</sub> =19,3 P=0,05		Модель адекватна!	

Окончание табл.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Коэффициенты для отклика «У <sub>3</sub> »	B <sub>0</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>12</sub>	B <sub>13</sub>	B <sub>23</sub>	B <sub>11</sub>	B <sub>22</sub>	B <sub>33</sub>

Оценка значим.	Доверит. интервал $\Delta B_i=2,92$ .	31,70	-6,10	-1,34	-1,28	-1,12	-0,61	0,89	-6,10	-1,34	-1,28
		Значим.	Значим.	Незначим.	Незначим.	Незначим.	Незначим.	Незначим.	Значим.	Незначим.	Незначим.
Модель		$Y_3=31,7-6,1X_1-6,1X_2^2$					$F_{расч}=8,35$	$F_{табл.}=19,3$ $P=0,05$	Модель адекватна!		
Коэффициенты для отклика «У <sub>4</sub> »		$B_0$	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$B_{12}$	$B_{13}$	$B_{23}$	$B_{11}$	$B_{22}$	$B_{33}$
Оценка значим.	Доверит. интервал $\Delta B_i=1,21$	6,200	-0,20	2,090	0,080	-0,60	-0,23	0,590	-0,20	2,090	0,080
		Значим.	Незначим.	Значим.	Незначим.	Незначим.	Незначим.	Незначим.	Незначим.	Значим.	Незначим.
Модель		$Y_4=6,2+2,09X_2+2,09X_2^2$					$F_{расч}=10,0$	$F_{табл.}=19,3$ $P=0,05$	Модель адекватна!		

В результате была получена следующая модель для искомого отклика – прочности при разрыве в кодированных единицах:

$$Y_1=1,7+0,17X_2+0,2X_3+0,17X_2^2+0,2X_3^2.$$

Анализ модели свидетельствует, что из всех влияющих факторов наиболее влиятельным на прочность футеровки при разрыве является фактор «X<sub>3</sub>» - время перемешивания компонентов в смесителе.

Аналогично была получена модель для искомого отклика - прочности футеровки при срезе в кодированных единицах:

$$Y_2=5,98+2,75X_2+2,75X_2^2.$$

Анализ модели свидетельствует, что единственным влияющим фактором на прочность при срезе является фактор «X<sub>2</sub>» - содержание борной кислоты, %.

Для искомого отклика Y<sub>3</sub>- газопроницаемости, характеризующей плотность, бала получена следующая модель:

$$Y_3=31,7-6,1X_1-6,1X_1^2.$$

Анализ модели свидетельствует, что единственным влияющим фактором является содержание мелкодисперсного наполнителя – маршалита, %.

Для функции отклика «Y<sub>4</sub>» – термостойкости была получена следующая модель:

$$Y_4=6,2+2,09X_2+2,09X_2^2.$$

Единственным влияющим фактором на термостойкость являлся фактор «X<sub>2</sub>» - содержание борной кислоты, %.

Аналогично были получены уравнения для искомым функций откликов для лопастного смесителя:

$$Y_1=1,24+0,28X_2-0,2X_1X_2+0,28X_2^2;$$

$$Y_2=3,64+1,65X_2+1,65X_2^2;$$

$$Y_3=31,66-6,98X_1-6,98X_1^2;$$

$$Y_4=4,27+0,99X_2+0,99X_2^2.$$

Следующим этапом после получения искомым моделей, описывающих локальные области факторного пространства по отдельным функциям откликов, надлежало принять решение: как найти оптимальный состав футеровки? Следует ли оптимизировать технологию в направлении градиента условной обобщающей целевой функции (если конечно она существует и может быть получена)? Либо, проанализировав поверхности всех откликов функций, определить оптимум методом вариационного вычисления для каждого смесителя отдельно? Для этого с помощью программного средства Mathcad 13 [9] были получены графики условных экстремумов функций (рис.1-4).

На рис.1 показана зависимость прочности футеровки при разрыве ( $Y_1$ ) от содержания борной кислоты ( $X_2$ ), времени перемешивания в смесителе ( $X_3$ ) в кодированных значениях.

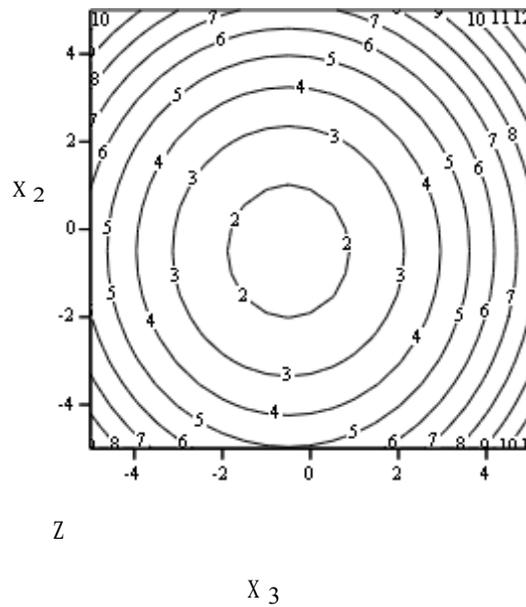


Рис.1. Прочность при разрыве в нагретом ( $1000^{\circ}\text{C}$ ) состоянии

На рис.2 представлена зависимость прочности при срезе ( $Y_2$ ) от содержания маршалита ( $X_1$ ) и борной кислоты ( $X_2$ ) в кодированных значениях.

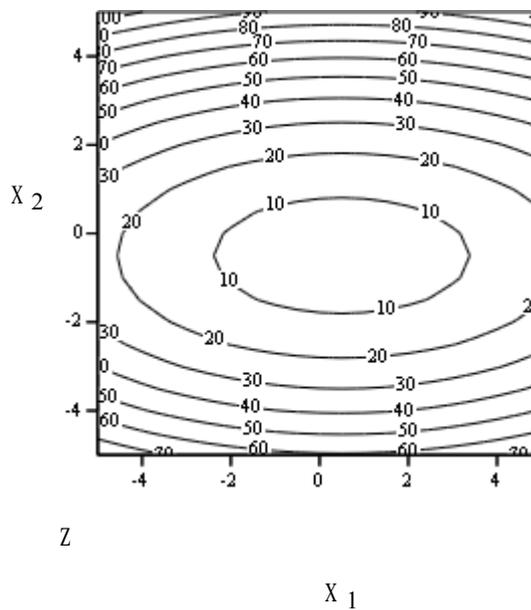


Рис.2. Прочность при срезе в нагретом ( $1000^{\circ}\text{C}$ ) состоянии

На рис.3. мы видим зависимость термостойкости футеровки ( $Y_4$ ) от содержания маршалита ( $X_1$ ) и борной кислоты ( $X_2$ ) в кодированных значениях.

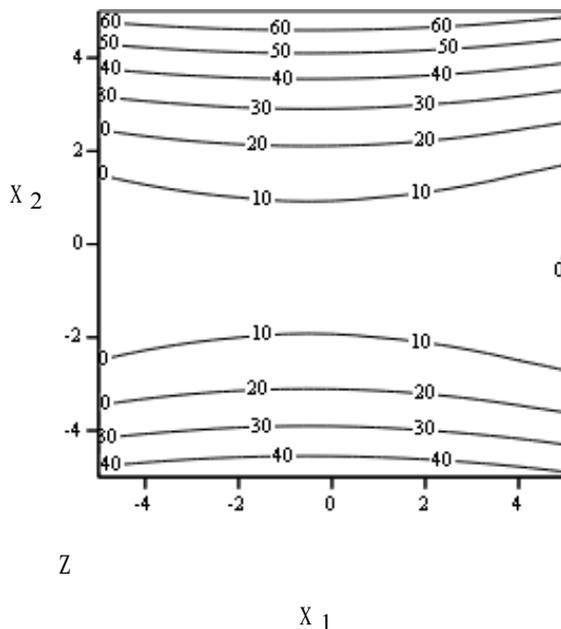


Рис.3. Термостойкость циклов

На рис.4 показана зависимость газопроницаемости образцов футеровки ( $Y_3$ ) от содержания маршалита ( $X_1$ ) и борной кислоты ( $X_2$ ) в кодированных значениях.

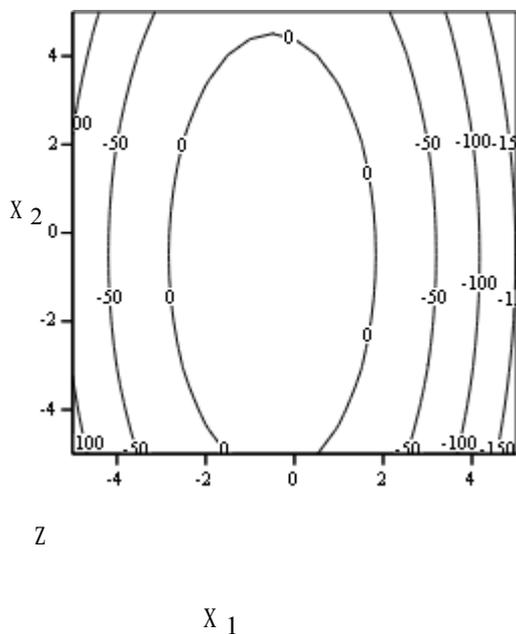


Рис.4. Газопроницаемость образцов футеровки после спекания

Проведённый анализ поверхностей откликов и их точек экстремумов свидетельствовал о том, что точки условных максимумов и минимумов целевых функций лежат в разных областях, и обобщённая функция, описывающая необходимое качество футеровки, не может быть составлена. Единственный путь поиска условного оптимума может быть получен с помощью метода вариационного исчисления по составленной программе в установленных границах факторов.

С помощью вариационного исчисления были получены наиболее перспективные составы футеровки для каждого смесителя отдельно. Полученные расчётом составы после некоторого анализа считали оптимальными [8].

**Реализация исследований на производстве.** По рекомендованным составам приготавливали состав и изготавливали футеровку производственных плавильных печей для выплавки чугуна. Технологию изготовления футеровки из рекомендованных составов не меняли. Хотя лабораторные испытания показали, что лучшими свойствами обладает смесь компонентов, приготовленная в катковом смесителе, в производственных условиях смесь приготавливали в имеющемся лопастном смесителе.

Производственные испытания подтвердили предложенные рекомендации, направленные на повышение стойкости футеровки оптимизацией её состава. В производственных условиях стойкость экспериментальных составов футеровки увеличилась более чем в два раза и достигала 32...36 плавов до ремонта печи.

Технологу и начальнику литейного цеха завода «КОНОРД» (г. Ростов-на-Дону) были переданы следующие технологические рекомендации.

1. Гранулометрический состав огнеупорного наполнителя можно ограничить одним кварцевым песком с высоким содержанием диоксида кремния ( $\text{SiO}_2 > 97\%$ ) с сосредоточенной зерновой структурой. Содержание крупнозернистой составляющей должно находиться в пределах 80% (величина среднего диаметра зерна  $D_{cp} = 27 \cdot 10^{-5}$  м), а тонкой и пылевидной фракций – 20%. Соответственно (величина среднего диаметра зерна  $D_{cp} = 57 \cdot 10^{-6}$  м).

2. Технология приготовления состава футеровки предусматривает замену лопастного смесителя смесителем каткового типа с продолжительностью перемешивания компонентов не менее 10 минут.

3. Продолжительность работы футеровки (стойкость) может быть ещё значительно увеличена в случае замены кварцитов на материалы более высокой огнеупорности, например, дистен-силиманитовый концентрат или корунд, с сохранением рекомендованного гранулометрического состава и количества связующего.

**Выводы.** Математическое моделирование позволяет не только анализировать влияние отдельных факторов на целевую функцию, а в некоторых случаях и их совместное влияние, но и находить экстремум обобщённой функции. В данном случае обобщённой функцией была определена стойкость футеровки, которую отдельными свойствами гетерогенной системы оценить невозможно. Применение метода математического моделирования

позволило определить состав и значительно (на 40-50%) увеличить стойкость футеровки плавильных печей без замены используемых материалов.

#### **Библиографический список**

1. Трофимов М.Г. Футеровка индукционных печей / М.Г. Трофимов. – М.: Metallurgy, 1968. – 288 с.
2. Бут Ю.М. Химическая технология вяжущих материалов: учебник для вузов под ред. В.В. Тимашова / Ю.М. Бут, М.М. Сычёв, В.В. Тимашов. – М.: Высшая школа, 1980. – 472 с.
3. Дудеров И.Г. Общая технология силикатов/ И.Г.Дудеров, Г.М.Матвеев, В.Б. Суханова. – М.: Стройиздат, 1987. – 560 с.
4. Долотов Г.П. Печи и сушилка литейного производства / Г.П. Долотов, Е.А. Кондаков. – М.: Машиностроение, 1990. – 304 с.
5. Берг П.П. Качество литейной формы / П.П. Берг. – М.: Машиностроение, 1970. – 286 с.
6. Глинский Б.А. Моделирование как метод научного исследования / Б.А. Глинский, Б.С.Грязнов, Б.С.Дынин, Е.П. Никитин и др. – М.: Изд. Моск. гос. ун-та, 1985. – 125 с.
7. Цимбал В.П. Математическое моделирование металлургических процессов / В.П. Цимбал. – М.: Metallurgy, 1986. – 253 с.
8. Зинченко Ю.А. Моделирование и оптимизация процессов литейного производства: учеб. пособие / Ю.А. Зинченко. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2001. – 68 с.
9. Кирьянов Д.В. Mathcad 13. / Д.В. Кирьянов. – СПб: «БХВ-Петербург», 2006. – 608 с.: ил.

Материал поступил в редакцию 27.03.09.

#### **J.A. ZINCHENKO**

#### **OPTIMIZATION OF ISOLATION STRUCTURE OF SMELT FURNACES**

The problem about funding of structure of isolation with greatest stability is considered. In the article, there are results of isolation characteristics of crucible furnaces for smelting of cast iron. Modeling of mix preparing for isolation is carried out and its optimal structure is defined. Recommendations of selection and preparing of structure of isolation with the greatest resistance are given.

**ЗИНЧЕНКО Юрий Алексеевич** (р.1950), директор филиала ГОУ ВПО ДГТУ в г. Ессентуки, кандидат технических наук (1982), доцент. Окончил РИСХМ (1974) по специальности «Машины и технология литейного производства».

Область научных интересов: формовочные материалы, смеси, литейные формы, регенерация песка из отработанных смесей литейных цехов; автоматизация и оптимизация процессов литья.

Автор более 43 научных статей, в том числе имеет 2 авторских свидетельства СССР.