

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛИТОЙ ПЛИТЫ МЕТОДОМ ПЛАНИРУЕМОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

И.Н. Ердаков, В.М. Ткачев

## CAST PLATE PRODUCTION PROCESS RESEARCH BY PLANNED EXPERIMENT METHOD

I.N. Erdakov, V.M. Tkachev

Рассмотрен процесс построения регрессионной модели для нового технологического процесса изготовления литых плит из стали Гадфильда для Челябинского электрометаллургического комбината.

*Ключевые слова:* литниковая система, плита, отливка, сталь Гадфильда, дефект, прибыль, метод планируемого эксперимента, регрессионная модель.

This paper presents a process of regression model generation for new technological process of cast plate production from Hadfield steel for the Chelyabinsk Electrometallurgical Plant.

*Keywords:* gating system, plate, casting, Hadfield steel, defect, profit, planned experiment method, regression model.

Анализ исследований в области изготовления литых плит к дробильным установкам показывает, что наилучшие показатели отливок данного типа достигаются при использовании высокомарганцевистой стали марки 110Г13Л, известной еще как сталь Гадфильда. Технологический процесс изготовления плит из данной стали изучался многими исследователями [1-3], однако до сих пор отсутствуют технологические решения, обеспечивающие простоту, ресурсосбережение и стабильность процесса.

В условиях действующего литейного производства ОАО «ЧЭМК» (г. Челябинск) была разработана новая технология литья плит, которая устранила указанные выше недостатки процесса [4].

В технологических картах оценивали такие дефекты, как степень коробления, м; наличие трещин (общая протяженность трещин, мм) и наличие песочных раковин,  $\text{см}^3/\text{дм}^2$ . Для оценки суммарного безразмерного показателя дефектности отливки ( $\Sigma Dv_i = Dv_1 + Dv_2 + Dv_3$ ) значения каждого из показателей привели к нормированному виду (максимальному значению дефекта присвоили индекс «1»):  $Dv_1^{\max} = 8 \text{ мм}$ ,  $Dv_2^{\max} = 915 \text{ мм}$ ,  $Dv_3^{\max} = 0,2 \text{ см}^3/\text{дм}^2$ . Температура заливки стали поддерживалась постоянной и составляла 1400...1450 °С. Варьируемыми параметрами были суммарная площадь питателя  $W_{\text{п}}$ , протяженность шлакоуловителя  $\Sigma L_{\text{шл}}$  (суммарные площади шлакоуловителя и стояка были фиксированными и составляли –  $\Sigma W_{\text{шл}} = 28,0 \text{ см}^2$  и  $\Sigma W_{\text{ст}} = 28,3 \text{ см}^2$ ). Поверхность значений  $\Sigma Dv_i$  показана на рис. 1.

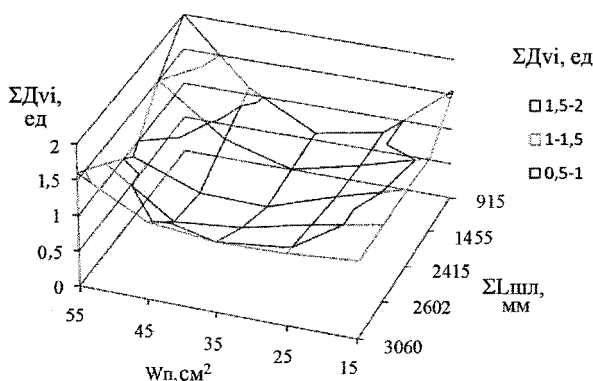


Рис. 1. Минимум поверхности суммарного безразмерного показателя дефектов в зависимости от параметров технологического процесса изготовления литой плиты

Из рис. 1 видно, что наименьшим показателям дефектности отвечает литниковая система с параметрами  $W_{\text{п}} = 35 \text{ см}^2$ ,  $\Sigma L_{\text{шл}} = 2415 \text{ мм}$ , имеющая стояк в месте изгиба шлакоуловителя и по четыре питателя на каждой ветви (Г-образная литниковая система). Для устранения образования утяжины (в нормированном виде дефект  $Dv_4^{\max} = 0,8 \text{ см}^3/\text{дм}^2$ ) в плите было изучено влияние местоположения прибыли и ее объем. Установлено, что наилучшее питание для Г-образной литниковой системы обеспечивает «угловая» прибыль, местоположение которой показано на рис. 2. Полученная экспериментальным путем графическая зависимость (рис. 3) показывает эффективный объем такой прибыли, который должен быть не ниже  $9000 \text{ см}^3$ .

В целях изучения особенностей процесса формирования плиты по разработанной техноло-

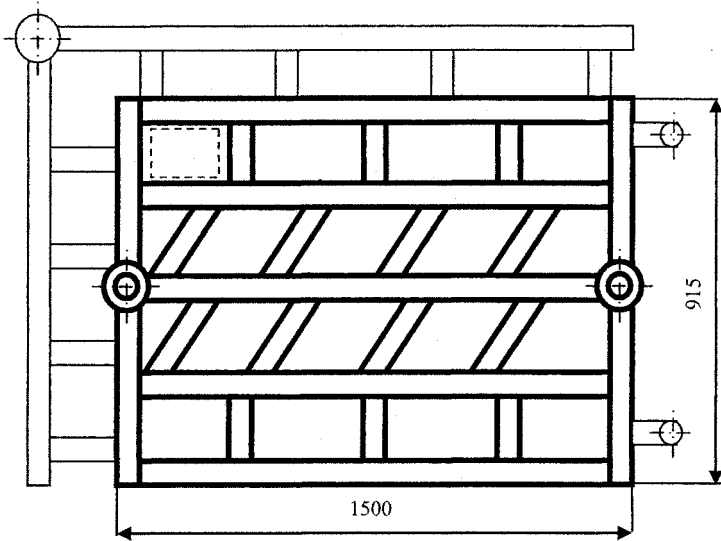


Рис. 2. Местоположение прямой «угловой» прибыли на плите-отливке с Г-образной литниковой системой (обозначено пунктирной линией)

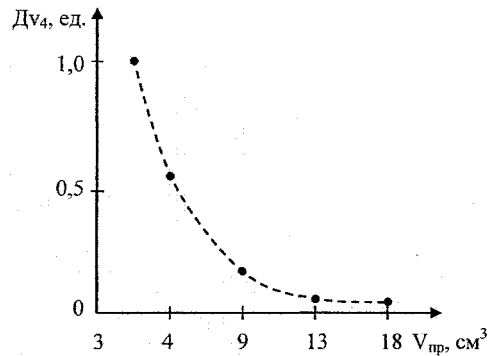


Рис. 3. Значения утяжины в плите для разных объемов «угловой» прибыли

гии необходимо было создать математическую модель и изучить влияние параметров процесса на качество изготовления отливок.

Поставленная задача решалась методом планируемого эксперимента [5].

Была проведена серия опытов, в которой по определенному плану (матрице) исследовали новый технологический процесс литья плит. Пределы варьирования параметров технологии выбирали в соответствии с данными, представленными на рис. 1 и 2.

В связи с тем, что новая конструкция литниковой системы обеспечивает меньший температурный градиент и минимальные значения коробления плит, то в качестве варьируемых параметров

были взяты  $W_n$ ,  $V_{пр}$  и  $T_{зал}$ . В ходе экспериментов в технологических картах фиксировали значения таких дефектов, как степень коробления ( $Sk$ ), утяжина ( $UT$ ) и песочная раковина ( $Pr$ ). Уровни варьирования представлены в табл. 1.

Из каждой плавки заливалось по восемь литейных форм с замером температуры заливки расплава. Всего было изготовлено 24 плиты. В табл. 2 и 3 приведены реализованные матрицы планирования для дробного факторного эксперимента и показаны результаты опытов.

Математическую модель технологического процесса, характеризующую зависимость между параметрами новой технологии и свойствами плиты, выразим полиномом I степени:

Таблица 1

Уровни варьирования переменных

Параметр	Уровни		
	-1	0	+1
$x_1 (W_n), \text{см}^2$	22	36	50
$x_2 (V_{пр}), \text{см}^3$	6500	11000	15500
$x_3 (T_{зал}), \text{°C}$	1380	1420	1460

Таблица 2

Матрица планирования ДФЭ<sup>2</sup>

№ плана	Уровень фактора							Исследуемые свойства*		
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$x_1x_2x_3$	$Sk$	$UT$	$Pr$
1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	2	0,10	0,040
2	-1	-1	1	1	-1	-1	1	0	0,04	0,050
3	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	0,06	0,030
4	-1	1	1	-1	-1	1	-1	0	0,01	0,040
5	1	-1	-1	-1	-1	1	1	3	0,33	0,013
6	1	-1	1	-1	1	-1	-1	3	0,19	0,016
7	1	1	-1	1	-1	-1	-1	4	0,08	0,013
8	1	1	1	1	1	1	1	2	0,02	0,020

\* Указаны средние значения.

Результаты проведенных экспериментов

Sk <sub>i</sub>			U <sub>T<sub>i</sub></sub>			Pr <sub>i</sub>			D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>
I	II	III	I	II	III	I	II	III			
1	2	3	0,13	0,1	0,07	0,04	0,03	0,05	1	8,6409	0,0009
0	0	0	0,02	0,08	0,02	0,05	0,06	0,04	0	0,0100	0,0012
0	2	1	0,04	0,10	0,04	0,03	0,04	0,02	1	0,0100	0,0012
0	0	0	0,01	0	0,02	0,04	0,05	0,03	0	0,0100	0,0001
3	4	2	0,33	0,38	0,28	0,01	0,01	0,02	1	0,0300	0,0025
4	4	1	0,25	0,12	0,20	0,03	0,01	0,01	3	0,1300	0,0043
3	4	5	0,05	0,09	0,10	0,01	0,02	0,01	1	0,0400	0,0007
2	1	3	0,01	0,02	0,03	0,02	0,03	0,01	1	0,0100	0,0001

$$y = b_0 + \sum b_i x_i + \sum b_{ij} x_i x_j$$

где y - исследуемое свойство отливки; x<sub>i</sub> x<sub>j</sub> - закодированные значения параметров технологии; b<sub>i</sub> b<sub>ij</sub> — коэффициенты регрессии, характеризующие степень влияния параметров технологического процесса на исследуемое свойство; b<sub>0</sub> — свободный член, характеризующий величину исследуемого свойства при удержании значений параметров технологии на нулевом уровне.

Коэффициенты регрессий определялись из выражения

$$b_i = \frac{\sum_{n=1}^N x_i y_n}{N}$$

где n - число параллельных операций (не менее трех); N - количество реализованных опытов.

Коэффициент регрессии считается значимым, если его значение выходит за границы доверительного интервала Δb<sub>i</sub>:

$$\Delta b_i = \pm t_{\alpha} \sqrt{D\{b_i\}}$$

где t<sub>α</sub> - табличное значение критерия Стьюдента; D{b<sub>i</sub>} - оценка дисперсии, связанной с определением коэффициентов модели, представляющая собой отношение общей дисперсии воспроизводимости выхода (D{y}) к произведению числа реализованных (N) и параллельных опытов (Π).

Параметры рассчитанных моделей показаны в табл. 4.

Полученные результаты можно записать в виде уравнений регрессии:

$$\begin{aligned} y_1 &= 1,875 + 1,125x_1 - 0,625x_3; \\ y_2 &= 0,103 + 0,051x_1 - 0,061x_2 - 0,038x_3 - 0,043x_{12}; \\ y_3 &= 0,027 - 0,012x_1. \end{aligned}$$

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. На степень коробления оказывает значительное влияние суммарное сечение питателей (b<sub>1</sub> = 1,125), а также температура заливки стали (b<sub>3</sub> = -0,625). При этом деформация плиты происходит тем меньше, чем меньше суммарное сечение питателей и больше температура заливки сплава. Данное влияние можно объяснить конструктивной особенностью Г-образной литниковой системы, обеспечивающей заполнение полости литейной формы с меньшим температурным градиентом по направлению фронта затвердевания. Для данной литниковой системы (Г-образной) значение температурного градиента имеет тенденцию к снижению при повышении температуры заливки стали.

2. На образование утяжины оказывает положительное влияние W<sub>п</sub> (b<sub>1</sub> = 0,051), а отрицательное - T<sub>зал</sub> (b<sub>2</sub> = -0,061). Естественно, чем больше объем прибыли и температура расплава в ней (T<sub>зал</sub> → max), тем эффективней она работает. При W<sub>п</sub> → min создаются условия для более быстрого затвердевания плиты. Моделью зафиксировано отрицательное совместное влияние W<sub>п</sub> и T<sub>зал</sub> (b<sub>12</sub> = -0,043).

3. На образование песочной раковины оказывает влияние только W<sub>п</sub> (b<sub>1</sub> = -0,012). Такое влияние объясняется увеличением скорости заливки расплава при снижении значений W<sub>п</sub>, а значит создаются условия с повышенной вероятностью размыва формы.

Таблица 4

Параметры рассчитанных моделей

Исследуемое свойство	Коэффициенты регрессии*								D <sub>ад</sub>	F
	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>123</sub>		
y <sub>1</sub>	1,875	1,125	(-0,125)	-0,625	(0,125)	(0,125)	(-0,125)	(-0,375)	0,975	0,975
y <sub>2</sub>	0,103	0,051	-0,061	-0,038	-0,043	(-0,011)	(0,011)	(0,008)	0,0026	1,918
y <sub>3</sub>	0,027	-0,012	(-0,002)	(0,003)	(-0,011)	(0,002)	(0,0004)	(0,0004)	0,0001	1,317

\* Незначимые коэффициенты взяты в скобки.

Полученные регрессионные модели новой технологии изготовления литых плит из стали Гадфильда позволят в дальнейшем осуществить оптимизацию параметров процесса и объяснить механизм формирования качественной отливки.

#### **Литература**

1. Скарбинский, М. Конструирование отливок / М. Скарбинский. - М; Л.: ГНТИ Ленингр. отд. Машгиза, 1961. - 575 с.
2. Василевский, П.Ф. Технология стального литья / П.Ф. Василевский. — М.: Машиностроение, 1974. - 408 с.

3. Нехендзи, Ю.А. Стальное литье / Ю.А. Нехендзи. - М : Metallurgizdat, 1974.-525 с.

4. Ердаков, И.Н. Новая технологи литья стальных плит дробильных установок ферросплавного производства / И.Н. Ердаков, В.М. Ткачев // Современные проблемы электрометаллургии стали: материалы XIV Междунар. конф. — Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010.

5. Адлер, А.Ю Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова. -М.: Наука, 1971. - 258 с.

**Поступила в редакцию 16 сентября 2010 г.**