



It is determined that application of bowl with lid for spheroidizing processing of melt allows to receive high-test cast iron without pyroeffect and smoke emission.

В. А. ЧАЙКИН, В. В. ИШУТИН, филиал МГОУ, Н. В. ЧАЙКИНА, МГТУ им. Баумана, В. П. МЕЩЕРЯКОВ, И. С. ЩЕМЕЛЕВ, РУП «МТЗ»

УДК 621.74

АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ

В РУП «МТЗ» производят отливки из высокопрочного чугуна марки ВЧ 50 массой от 1 до 90 кг. Это заготовки для деталей навесного оборудования, детали ведущего моста, различные крышки корпуса и другие отливки. Осваивается производство деталей тормозной системы, работающих в масляной ванне (мокрые тормоза) из ВЧ 70.

Плавка чугуна ведется в сталелитейном цехе в электропечах ДСП-6 с кислой футеровкой. В качестве шихтовых материалов используют чугун передельный, стальной лом, возврат собственного производства, ферромарганец ФМн 78, ферросилиций ФС75, медь для стабилизации перлитного превращения и графит.

Химический состав исходного перед модифицированием чугуна приведен в табл. 1.

Таблица 1

Элемент	С	Si	Mn	S	Cr	Mg	Ni	Ti
				Не более				
Содержание, %	3,6–3,9	1,0–1,7	0,5–0,7	0,03	0,15	0,25	0,02	0,01

Сфероидизирующее модифицирование расплава производят в установке ковш–крышка емкостью 1 т. Установка представляет собой чайниковый ковш со съемной крышкой. Высота ковша в 2 раза больше его диаметра. Конструкцией ковша предусмотрено наличие специального реакционного кармана, куда загружается модификатор. Крышка имеет футерованную приемную чашу для металла и заливочное отверстие. Последнее располагается таким образом, чтобы струя металла попадала в пустой карман. Модифицирование производится при температуре 1500–1530 °С чипс-модификатором ФСМГ7,5 в количестве 18 кг (1,8%). Сверху модификатор засыпается дробью в количестве 10 кг (1%). Высокопрочный чугун разливается ковшами емкостью 350 кг. При заполнении разливочных ковшей производится гра-

фитизирующее модифицирование расплава комплексным модификатором Zircalloy с барием и цирконием в количестве 0,4% от массы металла.

Для определения механических свойств высокопрочного чугуна заливаются клиновые пробы. Они располагаются в форме вместе с отливками. Проба для анализа механических свойств и микроструктуры отбирается из последней формы, залитой из последнего разливочного ковша. Марка чугуна определяется по результатам испытаний на растяжение стандартных образцов диаметром 14 мм и расчетной длиной 70 мм. На шейках образцов замеряется твердость. Из остатков образцов изготавливаются микрошлифы.

Механические свойства высокопрочного чугуна должны соответствовать требованиям, приведенным в табл. 2.

Таблица 2

Марка	Механические свойства			
	σв, МПа	σ0,2, МПа	δ, %	НВ
ВЧ45	450 (45)	310 (31)	10	140–225
ВЧ50	500 (50)	320 (32)	7	153–245

Рекомендуемый химический состав высокопрочных чугунов приведен в табл. 3.

На первом этапе исследований определяли изменение химического состава металла в процессе модифицирования. Для этого выполнили статисти-

ческие исследования химического состава чугуна до и после модифицирования. Анализировали химический состав чугуна перед выпуском из печи и чугун после модифицирования в первом ковше. Химический состав приведен в табл. 4.

Таблица 3

Марка	Химический состав, мас.%							
	C	Si	Mn	Cu	P	S	Cr	Mg
ВЧ45	3,3–3,8	1,9–2,9	0,3–0,7	□0,1	□0,1	□0,02	□0,2	□0,03
ВЧ50	3,2–3,7	1,9–2,9	0,3–0,7	0,1–0,25				

Таблица 4

Химический состав, мас.%	Кол-во измерений	Среднее значение	Минимум	Максимум	Дисперсия	Средне-квadraticное отклонение	Коэффициент вариации, %
C	61	3,66/3,59	3,33/3,37	3,85/3,87	0,09/0,011	0,008/0,01	2,4/3,0
Si	61	1,59/2,47	1,38/1,46	2,54/2,84	0,22/0,21	0,05/0,05	13,8/8,5
Mn	61	0,54/0,54	0,42/0,47	0,78/0,73	0,066/0,05	0,004/0,002	12,2/9,2
P	61	0,030/0,030	0,02/0,02	0,04/0,04	0,003/0,003	0,0/0,0	10/10
S	61	0,010/0,010	0,01/0,01	0,02/0,01	0,001/0,0	0,0/0,0	10/10
Cr	61	0,040/0,045	0,02/0,01	0,07/0,08	0,014/0,017	0,0/0,0	35/37
Ni	61	0,036/0,037	0,02/0,02	0,07/0,07	0,014/0,014	0,0/0,0	38/38
Cu	61	0,19/0,19	0,15/0,15	0,42/0,42	0,06/0,05	0,003/0,003	31/31
Ti	61	0,011/0,012	0,01/0,01	0,02/0,02	0,003/0,004	0,0/0,0	27/27
V	61	0,010/0,01	0,01/0,01	0,01/0,01	0,0/0,0	0,0/0,0	0/0
Mg	61	0/0,050	0/0,013	0/0,076	0/0,0078	0/0,0	0/15

Как видно из таблицы, в процессе модифицирования изменяются содержания трех элементов. Особый интерес представляет усвоение магния. Процесс модифицирования расплава в установке ковш–крышка протекает относительно спокойно. Существенных пироэффекта и дымовыделения не наблюдается. Вместе с тем, усвоение магния в процессе модифицирования низкое и составляет только 40%. Значительно пригорает кремний из модификаторов. Усвоение его достигает 80%. Наблюдается небольшой угар углерода. Концентрации других элементов практически не изменяются.

В дальнейшем определили стабильность качественных показателей высокопрочного чугуна. Шихтовые материалы, применяемые при выплавке чугуна, нормируются. Вместе с тем, на заводе не удастся производить шихтовку в соответствии с нормами расхода. Часто приходится отступать от них. Поэтому произвели статистическую обработку качественных показателей ВЧ за январь, июнь и июль 2005 г. и сравнили показатели. Использовали компьютерную программу STATISTICS & ANALISIS [1]. Результаты приведены в табл. 5–7.

Таблица 5

Механические свойства	Количество измерений	Среднее значение	Минимум	Максимум	Дисперсия	Среднеквadraticное отклонение	Коэффициент вариации, %
Твердость	54	201,5	170,00	241,00	336,85	18,35	9,11
Предел прочности при растяжении, МПа	54	641,5	540,00	780,00	3043,05	55,16	8,6
Относительное удлинение, %	54	10,4	6,00	14,00	3,181	1,783	17,14
Химический состав, мас. %:							
C	54	3,67	3,45	3,84	0,012	0,108	2,94
Si	54	2,54	2,33	2,85	0,010	0,102	4,02
Mn	54	0,52	0,43	0,61	0,001	0,037	7,12
P	54	0,03	0,03	0,03	0,000	0,000	0
S	54	0,01	0,01	0,01	0,000	0,000	0
Cr	54	0,041	0,03	0,07	0,000	0,013	31,71
Ni	54	0,033	0,01	0,06	0,000	0,012	36,36
Cu	54	0,19	0,1	0,23	0,0005	0,021	11,05
Ti	54	0,010	0,01	0,02	0,000	0,003	30
V	54	0,010	0,01	0,02	0,000	0,003	30
Mg	54	0,057	0,04	0,08	0,000	0,008	14,04

Таблица 6

Механические свойства	Количество изм.	Среднее значение	Минимум	Максимум	Дисперсия	Среднеквадратичное отклонение	Коэффициент вариации, %
Твердость	62	203,48	187,00	229,00	103,56	10,18	5,00
Предел прочности при растяжении, МПа	62	622,74	470,00	760,00	1859,57	43,12	6,92
Относительное удлинение, %	62	10,26	2,0	13,50	3,86	1,96	19,1
Химический состав, мас. %:							
C	62	3,60	3,31	3,83	0,014	0,119	3,31
Si	62	2,41	2,15	2,65	0,013	0,12	4,98
Mn	62	0,53	0,48	0,63	0,001	0,029	5,47
P	62	0,03	0,03	0,05	0,000	0,0028	9,33
S	62	0,01	0,01	0,02	0,000	0,0013	13
Cr	62	0,032	0,08	0,08	0,000	0,008	25,9
Ni	62	0,024	0,02	0,06	0,000	0,0066	27,5
Cu	62	0,18	0,07	0,21	0,000	62	10
Ti	62	0,010	0,010	0,010	0,000	0,000	0
V	62	0,011	0,01	0,02	0,000	0,0032	23,09
Mg	62	0,052	0,038	0,070	0,000	0,0079	15,1

Таблица 7

Механические свойства	Количество изм.	Среднее значение	Минимум	Максимум	Дисперсия	Среднеквадратичное отклонение	Коэффициент вариации, %
Твердость	49	202,18	170,00	229,00	301,32	17,35	8,58
Предел прочности при растяжении, МПа	49	627,14	510,00	720,00	3258,33	57,08	9,10
Относительное удлинение, %	49	10,16	0,60	15,00	7,93	2,81	27,6
Химический состав, мас. %:							
C	49	3,54	3,37	3,79	0,012	0,11	3,1
Si	49	2,33	2,08	2,59	0,012	0,11	4,72
Mn	49	0,53	0,45	0,62	0,001	0,034	6,4
P	49	0,03	0,020	0,04	0,000	0,002	6,66
S	49	0,01	0,010	0,02	0,000	0,0014	14
Cr	49	0,044	0,030	0,11	0,000	0,020	45
Ni	49	0,030	0,010	0,11	0,000	0,016	53
Cu	49	0,18	0,150	0,22	0,000	0,014	7,7
Ti	49	0,010	0,010	0,02	0,000	0,0014	2,8
V	49	0,010	0,010	0,010	0,000	0,000	0
Mg	49	0,50	0,035	0,068	0,000	0,0075	15

Как видно из таблиц, средние значения механических свойств и химического состава чугуна близки друг к другу. Это свидетельствует о том, что в случае обеспечения требуемого химического состава расплава при выплавке чугуна несоответствие шихтовых материалов нормам расхода не оказывает существенного влияния на механические свойства чугуна. Так как средние значения показателей в каждом месяце все же отличаются друг от друга, необходимо ответить на вопрос, чем объясняется это различие, случайной ошибкой экспериментов или это отличие не случайно и связано с нестабильностью шихтовых материалов [2]. Оценка средних значений показателей по *t*-критерию показала, что нет существенных различий в средних значениях качественных показате-

телей чугуна в течение трех анализируемых месяцев. Поэтому в дальнейшем изучали объединенную выборку механических свойств и химического состава. Как известно, чем больше выборка, тем устойчивее результаты статистического, корреляционного и регрессионного анализов, в силу того, что отдельные аномальные явления не могут оказать на них существенного влияния [3]. Основные показатели статистики за три месяца работы цеха приведены в табл. 8.

О стабильности свойств судили по величине вариаций. Наиболее наглядно характеризует однородность свойств коэффициент вариации, так как показывает относительную меру колебаний признака и позволяет сравнивать различные по своему характеру свойства [4]. Последний расчи-

Таблица 8

Механические свойства	Количество изм.	Среднее значение	Минимум	Максимум	Дисперсия	Среднеквадратичное отклонение	Коэффициент вариации, %
Твердость	165	202,4	170	241,00	236,251	15,370	7,59
Предел прочности при растяжении, МПа	165	630,2	470	780,00	2694,479	51,908	8,24
Относительное удлинение, %	165	10,2	0,6	15,0	4,791	2,189	21,46
Химический состав, мас. %:							
C	165	3,61	3,31	3,84	0,015	0,124	3,43
Si	165	2,43	2,08	2,850	0,019	0,137	5,64
Mn	165	0,53	0,43	0,630	0,001	0,034	6,42
P	165	0,030	0,02	0,050	0,000	0,002	6,67
S	165	0,010	0,01	0,020	0,000	0,001	10
Cr	165	0,038	0,02	0,110	0,000	0,015	39,47
Ni	165	0,029	0,01	0,110	0,000	0,013	44,83
Cu	165	0,188	0,07	0,230	0,000	0,019	10,1
Ti	165	0,010	0,01	0,020	0,000	0,002	20
V	165	0,011	0,01	0,020	0,000	0,003	27,27
Mg	165	0,054	0,04	0,079	0,000	0,008	14,81

тывается как отношение среднего квадратичного отклонения к средней арифметической и выражается в процентах.

Как видно из таблицы, концентрации элементов, которые получают расчетным путем и доводят до требуемых значений введением ферросплавов, а именно углерод, кремний, марганец и медь достаточно однородны. Менее стабильно содержание магния. Масса металла, заливаемого в ковш, контролируется. Вместе с тем, наполнить ковш ровно 1 т чугуна практически невозможно. Поэтому бывают незначительные переливы и недоливы металла, что сказывается на количестве усваиваемого магния. Концентрации элементов таких, как хром, никель, титан и ванадий изменяются в широких пределах. Однако содержания их невысокие. Низкие концентрации в чугуне также и вредных примесей серы и фосфора. В результате механические свойства чугуна отвечают требованиям технических условий и достаточно стабильны. Твердость и предел прочности чугуна всех плавков соответствовали требованиям ГОСТ. Менее однородно относительное удлинение, которое наиболее чувствительно к колебаниям химического состава. Каждый месяц наблюдались отклонения по этому показателю. Однако при повторных испытаниях плавки признавались годными. В целом можно говорить о высокой технологической дисциплине на участке плавки и стабильности процесса модифицирования в установке ковш – крышка.

Для определения элементов, наиболее сильно влияющих на механические свойства, а также для анализа себестоимости чугуна, целесообразно произвести регрессионный анализ зависимости

механических свойств чугуна от химического состава. При решении задач статистики часто требуется, чтобы исходные данные имели нормальный закон распределения. Это объясняется тем, что большинство методов математической статистики, в том числе и регрессионный анализ, разработаны применительно к случаям нормального распределения [3]. Анализ нормальности распределения изучаемых показателей по критериям Колмогорова–Смирнова и Шапиро–Уилкса позволил принять гипотезы о нормальности распределения показателей качества и приступить к регрессионному анализу. В качестве примера на рис. 1 показана гистограмма предела прочности с вычисленными критериями.

Уравнения регрессии зависимости механических свойств от химического состава имеют вид $\sigma_B = 646 + 32C - 107Si + 67Mn + 125P - 3602S + 535Cr + 480Ni + 349Cu + 3281Ti + 1129V + 967Mg$,

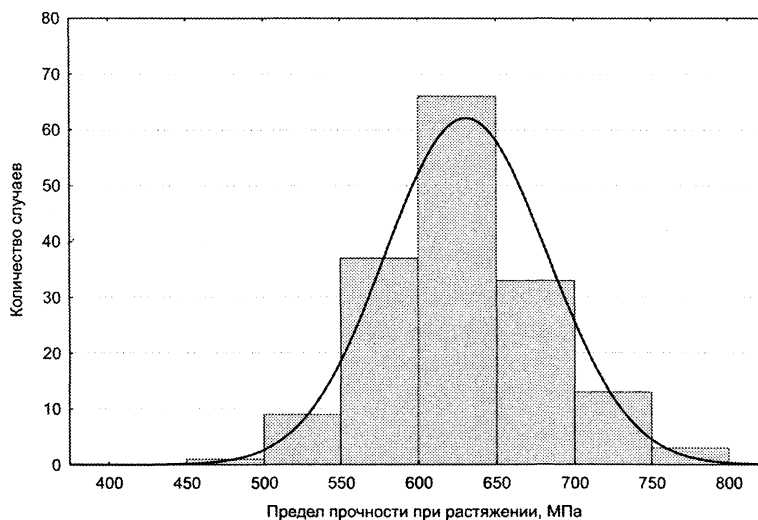


Рис. 1. Гистограмма предела прочности с нанесенной плотностью нормального распределения

$$\delta = 7,9 - 1,5C + 4,9Si - 1,7Mn - 5P + 137S - 24Cr - 12Ni - 2,6Cu - 13,3Ti + 8V - 27Mg,$$

$$HB = 191 + 5C - 26Si + 36Mn + 396P - 545S + 181Cr + 59Ni - 8Cu + 996Ti + 702V + 128Mg.$$

Адекватность моделей проверяли с помощью анализа остатков. Остатки представляют собой отклонения наблюдаемых значений от вычисленных с помощью уравнений регрессии. Анализ показал, что последовательные остатки независимы между собой, имеют нормальный закон распределения с нулевым математическим ожиданием и постоянной дисперсией [5]. В качестве примера на рис. 2 приведена гистограмма распределения остатков для предела прочности при растяжении. Адекватность моделей подтвердилась также проверкой их по критериям Дарбина–Уотсона.

В анализе уравнений представляет интерес значимость коэффициентов регрессии. Чем значимее коэффициент, тем большее влияние оказывает химический элемент на механические свойства чугуна. Установлено, что в пределах концентраций встречающихся на заводе элементов, которые получают расчетным путем и доводят до требуемых значений введением ферросплавов, наиболее значимыми оказались содержания кремния и магния. Существенное влияние на механические свойства чугуна оказывает кремний. Этот элемент способствует графитизации чугуна и ферритизации матрицы. Он соответственно снижает прочность и твердость чугуна, вместе с тем повышает пластичность. Влияние магния обратное и менее значительно. Из элементов, которые определяются качеством шихтовых материалов и не регулируются в процессе плавки, наиболее существенно влияет хром. Как наиболее сильный карбидообразующий элемент, стабилизирующий перлит, он повышает твердость и прочность чугуна, а пластичность снижает. Пошаговая регрессия подтвердила сказанное выше.

Пошаговая регрессия позволяет получить наилучшую регрессионную модель, при построении которой независимые переменные включаются в модель на каждом шаге процедуры, пока не будет получена наиболее адекватная модель. При этом незначимые коэффициенты исключаются.

Уравнения регрессии зависимости механических свойств от химического состава, полученные с помощью пошаговой регрессии, имеют вид

$$\sigma_b = 751 - 93Si + 889Cr + 1360Mg,$$

$$\delta = 2,55 + 4,5Si - 31,4Cr - 37,4Mg,$$

$$HB = 241 - 24Si + 220Cr + 214Mg.$$

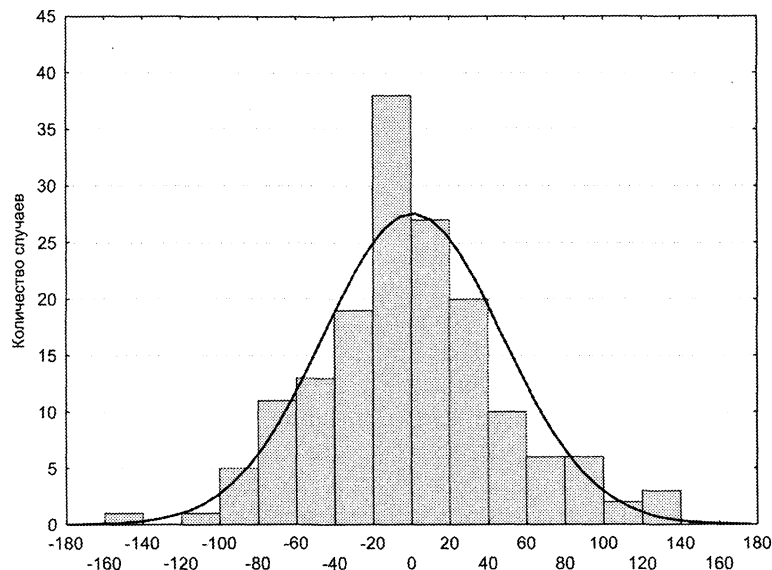


Рис. 2. Гистограмма остатков с нанесенной плотностью нормального распределения

Это подтверждает сделанный ранее вывод о том, что в случае обеспечения требуемого химического состава расплава при выплавке чугуна несоответствие шихтовых материалов нормам расхода не оказывает существенного влияния на механические свойства чугуна с учетом того, что колебания хрома в металле незначительны.

Анализ показывает, что чугун марки ВЧ50 имеет большой запас механических свойств как по прочности, так и по пластическим характеристикам. Поэтому содержание кремния в чугуне можно снизить на 0,3–0,4% и при этом сохранить свойства на требуемом уровне. Но самый оптимальный вариант для снижения себестоимости высокопрочного чугуна – это исключение из металлозавалки ферромарганца и одновременное уменьшение расхода ферросилиция. Одновременное снижение марганца и кремния в металле компенсируют их влияние на механические свойства и позволяют сохранить их на достигнутом уровне.

Таким образом, установлено, что применение ковша с крышкой для сфероидизирующей обработки расплава дает возможность получать высокопрочный чугун без пироэффекта и дымовыделения. В сочетании с высокой технологической дисциплиной, имеющей место на Минском тракторном заводе, этот способ модифицирования позволяет получать стабильные качественные показатели высокопрочного чугуна.

Литература

1. Салин В.Н., Чурилова Э.Ю. Практикум по курсу «Статистика» (в системе STATISTIKA). М.: «Издательский дом» Социальные отношения», Изд-во «Перспектива», 2003.
2. Афифи А., Эйзен С. Статистический анализ. Подход с использованием ЭВМ / Пер. с англ. М.: Мир, 1982.
3. Поллард Д. Справочник по вычислительным методам статистики / Пер. с англ. М.: Финансы и статистика, 1982.
4. Хазанов Ю. С. Статистика. М.: Статистика, 1974.
5. Демиденко Е. З. Линейная и нелинейная регрессии. М.: Финансы и статистика, 1982.