

УДК 669.16.018

**М. Б. Бабанлы, Э. А. Алиев*, Б. Г. Гусейнов, Н. А. Гафаров,
Т. Г. Джаббаров**

Азербайджанский Государственный Университет Нефти и Промышленности, Баку

*Азербайджанский Технический Университет, Баку

РАЗРАБОТКА ОПТИМАЛЬНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПЛАВКИ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННОГО ЧУГУНА И ЕГО КОНТРОЛЬ ПО МЕТОДУ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Рассмотрена возможность разработки оптимального технологического процесса, обеспечивающего получение требуемых свойств наиболее рациональным способом. Исследование проведено по методу планируемого эксперимента. В качестве основных исследуемых факторов выбраны содержание углерода, кремния, марганца, температура перегрева чугуна и количество модификаторов по количеству усвоенного кремния. Для плавок применен высококачественный чугун, выплавленный по технологии, разработанной авторами. Обработка полученных данных дала возможность установить основные уравнения регрессии. Анализ этих уравнений показывает, что основная характеристика чугуна – прочность при растяжении – зависит от углеродного эквивалента.

Ключевые слова: графитовые включения, перлит, феррит, цементит, модификатор, отбел, коэффициент регрессии, углеродный эквивалент.

Розглянута можливість розробки оптимального технологічного процесу, що забезпечує набуття необхідних властивостей найбільш раціональним способом. Дослідження проведено по методу планованого експерименту. В якості основних досліджуваних чинників вибрані вміст вуглецю, кремнію, марганцю, температура перегрівання чавуну і кількість модифікаторів по кількості засвоєного кремнію. Для плавок застосовано високоякісний чавун, виплавлений за технологією, розробленою авторами. Обробка отриманих даних дала можливість встановити основні рівняння регресії. Аналіз цих рівнянь показує, що основна характеристика чавуну – міцність при розтягуванні – залежить від вуглецевого еквіваленту.

Ключові слова: графітові включення, перліт, ферит, цементит, модифікатор, вибіл, коефіцієнт регресії, вуглецевий.

The possibility of developing an optimal manufacturing process, providing the desired properties of the most rational way have been examined. The study was conducted by the method of the planned experiment. The main factors to be studied were selected carbon, silicon, manganese content, cast iron overheat temperature and the amount of modifiers assimilated by the number of silicon. For the heats have used high-quality cast iron smelted with the technology developed by authors. Processing of the data allowed to establish the basic equations of regression. An analysis of these equations shows that the main characteristic of cast iron – tensile strength – depends on the carbon equivalent.

Keywords: *graphite inclusions, perlite, ferrite, cementite, modifier, regression coefficient, the carbon equivalent.*

В лабораторных исследованиях поставлена цель изучить связи между отдельными факторами, которые определяют качество выплавляемого металла, и установить пределы их целесообразного варьирования.

Проверяли не только свойства, но и структуру чугуна: длину, форму и распределение графитовых включений, количество и дисперсность перлита, количество ферритной и цементитной составляющих металлической матрицы.

В качестве основных исследуемых факторов на первом этапе выбраны содержание углерода, кремния, марганца, температура перегрева чугуна и количество модификаторов по количеству усвоенного кремния ($Si_{усв.}$).

Первоначально выбранные и уточненные в процессе исследований уровни и интервалы варьирования факторов приведены в табл.1.

Таблица 1. Уровни и пределы варьирования факторов в лабораторном исследовании

Условия планирования	X_1 (C, %)		X_2 (Si, %)		X_3 , $Si_{усв.}$, %	X_4 , $\Delta t_{пер.}$, °C	X_5 (Mn, %)	
	наме- ченные	реализо- ванные	наме- ченные	реализо- ванные			наме- ченные	реализо- ванные
Основной уровень	3,2	3,22	2,2	2,25	0,6	275	0,65	0,63
Интервал варьирования	0,2	0,18	0,4	0,4	0,2	75	0,35	0,34
Верхний уровень	3,4	3,4	2,6	2,5	0,8	350	1,0	0,97
Нижний уровень	3,0	3,04	1,8	1,85	0	200	0,30	0,29

Выходными параметрами приняты: прочность чугуна при растяжении (σ_B) и изгибе ($\sigma_{из}$), стрела прогиба (f), глубина отбела ($L_{отб}$), твердость (НВ), длина графита ($L_{гр}$) и количество перлита (Π) в сечениях разной толщины.

Для плавки применяли высококачественный чугун (синтетический), специально выплавленный из стального лома в однотонной печи промышленной частоты и разлитый на чушки.

Содержание кремния и марганца регулировали добавкой 75%-го ферросилиция и 75%-го ферромарганца. Модифицирование производили 75%-ным ферросилицием.

Плавки проводили в индукционной печи с емкостью тигля 150 кг. В каждой плавке заливали: четыре стандартных цилиндрических образца диаметром 30×340 для определения прочности при изгибе и растяжении, твердости и структуры; два образца на отбеливаемость; образцы диаметром 15 мм и образцы толщиной 60 и 100 мм для контроля структуры графита и твердости в сечениях разной толщины для оценки квазиизотропии чугуна.

Эксперименты проводили по схеме, представляющей собой 1/4 реплики от полного факторного эксперимента 2^5 . Данная реплика 2^{5-2} имела определяющий контраст $1 = x_1x_2x_3x_4 = x_1x_3x_5 = x_2x_4x_5$, что позволяло оценивать линейные эффекты совместно с тройными взаимодействиями. Матрица планирования приведена в табл. 2.

Каждая строка матрицы определяет условия проведения одного опыта. В соответствии с матрицей были проведены опыты. Каждый опыт по матрицам планирования дублировался. Все они были рандомизированы во времени. Средние результаты определения свойств чугуна по каждой строке матрицы планирования также помещены в табл. 2.

Таблица 2. Матрица планирования и результаты проведения эксперимента

Номер опыта	C	Si	Si _{ув}	$\Delta=t_{\text{пер}}$	Mn	Содержание элементов в чугунах, %			Температура перегрева, °C
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄ = X ₁ X ₂ X ₃	X ₅ = X ₁ X ₃	C	Si	Mn	
1	+	+	-	-	-	3,19	2,50	0,3	1390
2	+	+	+	+	+	3,26	2,4	1,0	1540
3	+	-	-	+	-	3,20	1,05	0,3	1570
4	+	-	+	-	+	3,15	1,7	0,91	1420
5	-	+	+	-	-	2,90	2,5	0,35	1440
6	-	-	-	-	+	2,86	1,7	0,1	1470
7	0	0	0	0	0	2,25	1,8	0,7	1500
8	0	0	0	0	0	3,0	2,1	0,7	1505
9	-	-	+	+	-	2,83	1,7	0,4	1620
10	-	+	-	+	+	2,82	2,4	1,0	1590

Продолжение табл. 2.

Механические свойства							Глубина отбела, мм	Микроструктура					
$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\sigma_{\text{н}}$, МПа	f, мм	твёрдость на образцах, НВ					длина графита в образцах, мкм				количество перлита в образцах, %	
			Ø15	Ø30	Ø60	Ø100		Ø15	Ø30	Ø60	Ø100	Ø60	Ø100
298	486	4,3	241	192	137	126	4,0	120	250	370	460	65	55
344	488	3,9	255	215	174	156	5,0	145	210	275	390	99	99
332	534	3,7	248	215	159	149	15	115	175	270	340	98	96
367	565	3,6	262	235	174	165	14	110	170	215	320	100	100
364	581	4,3	241	212	156	146	4,0	120	245	285	355	70	60
386	587	3,7	255	244	192	187	12	75	140	235	270	100	100
407	655	4,3	269	241	192	159	14	80	150	240	305	99	96
389	550	3,5	269	238	187	179	8,0	100	145	270	300	100	100
379	547	3,55	277	229	179	175	12	95	165	275	330	100	100
389	555	3,5	071	223	170	167	8,0	105	155	270	340	99	99

Примечания: 1. Обозначение уровней варьирования факторов: + – верхний, - – нижний, 0 – основной; 2. В образцах Ø 15 и Ø 30 мм металлическая основа имела во всех случаях 100 %-й перлит

Коэффициент регрессии рассчитывали по формуле:

$$b_i = \frac{\sum_{n=1}^N X_{in} Y_n}{N}$$

где n – номер эксперимента; i – номер фактора; N – число экспериментов в матрице планирования (сведенные в табл. 3).

Таблица 3. Коэффициенты уравнений регрессии для выходных данных различных свойств ($F_{\text{табл.}} = 9,55$)

y	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	$F_{\text{эмп}}$
$\sigma_{\text{в}}$	360	-2,6	-1,2	+1,0	+0,8	+1,0	5,72
$\sigma_{\text{н}}$	550	-3,7	-29	+1,7	0,1	-0,2	2,10
f	3,9	-0,04	+0,09	+0,1	-0,06	-0,2	2,80
$L_{\text{отб}}$	9,0	-0,1	-4,0	-0,4	+1,1	+0,1	1,12
HB_{15}	255	-3,5	-3,5	+1,8	+5,0	+5,0	6,95
HB_{30}	220	-10	-10	+0,5	+3,3	+9,0	5,9
HB_{60}	170	-10	-8	+2,6	+4,0	+10,0	1,6
HB_{100}	160	-10	-7	+2,0	+2,4	+13,0	1,95
L^{15}	110	+14	+13	+6,0	+3,0	-0,6	2,69
$L_{\text{тр}}^{30}$	186	+15	+14	+8,0	-16	-20,0	3,2
$L_{\text{тр}}^{60}$	270	+13	+30	-16	-6,0	-20,0	2,55
$L_{\text{тр}}^{100}$	340	+40	+30	-2,5	-6,0	-20,0	4,08
Π_{60}	91	-1,0	-8,0	+1,0	+8,0	+8,0	5,03
Π_{100}	88	-1,0	-10,0	+0,5	+9,0	+11,0	3,75

Доверительные интервалы коэффициентов регрессии определяли по формуле:

$$\Delta b_i = \pm t_{\alpha} N S_{b_i}$$

где $t_{\alpha} N$ – критерий Стьюдента (α – уровень значимости, принятый равным 0,05), для ориентировочной оценки можно принять $t_{\alpha} = 2$, S_{b_i} – среднеквадратичная ошибка коэффициента, вычисляемая по формуле:

$$S_{b_i} = \pm \frac{S_{\gamma}}{\sqrt{N}}.$$

Расчетные доверительные интервалы приведены в табл. 4.

Статистический анализ полученных моделей (проверка гипотезы их адекватности) проводили при помощи F -критерия. При этом эмпирические значения F -критерия оценивали из выражения:

$$F_{\text{эмп}} = \frac{S_{\text{ост}}^2}{S_7^2}.$$

Остаточную дисперсию $S_{\text{ост}}^2$ определяем делением измеренных значений свойств для экспериментов матрицы планирования на число степеней свободы:

$$S_{\text{ост}}^2 = \frac{\sum (y_{\text{расч}} - Y_{\text{эксп}})^2}{N - n - 1},$$

где n – число исследуемых факторов.

Табличные значения F -критерия для данных условий во всех случаях составляли 9,55. Сопоставление соответствующих эмпирических и табличных значений F -

Таблица 4. Расчетные величины ошибок эксперимента и значимости коэффициентов регрессии*

Величина ошибки	$\sigma_{n'}$ кг/мм ²	$\sigma_{n'}$ кг/мм ²	f , мм	$L_{орг}$, мм	HB _{15'} , МПа	HB _{30'} , МПа	HB _{60'} , МПа	HB _{100'} , МПа	$L_{гр}^{15}$, МКМ	$L_{гр}^{30}$, МКМ	$L_{гр}^{60}$, МКМ	$L_{гр}^{100}$, МКМ	$\Pi_{60'}$, %	$\Pi_{100'}$, %
$\pm S_y$	0,71	1,5	0,07	2,83	4,24	4,24	6,37	5,56	7,1	16,2	17,1	18,5	1,41	1,41
$\pm S_{bi}$	0,25	0,53	0,02	1,0	1,5	1,5	2,25	2,0	2,51	5,8	6,1	6,6	0,5	0,5
$\pm \Delta bi$	0,50	1,06	0,05	2,0	3,0	3,0	4,5	4,0	5,02	11,6	12,2	13,2	1,0	1,0

*Примечания: 1. $L_{гр}^{15}$, $L_{гр}^{30}$, $L_{гр}^{60}$, $L_{гр}^{100}$ – длина графитного включения в микронах (мкм) – 15, 30, 100 соответственно; 2. 15-этилон диаметр образца – 15 мм, также HB_{30'}, HB_{60'}, HB_{100'}

значений F - критерия для каждого из уравнений (табл. 3) свидетельствует об адекватности моделей ($F_{эмп.} - F_{табл.}$).

Переход к переменным, выраженным в натуральном масштабе, осуществлялся по формуле:

$$X_i = \frac{\Phi - X_{i0}}{r_i},$$

где Φ – значения изучаемого фактора, X_{i0} – значение основного уровня изучаемого фактора, r_i – интервал варьирования фактора.

Обработка полученных данных дала возможность установить основные уравнения регрессии. Характеризующие свойства чугуна в отливках, которые в натуральном масштабе представляются в следующем виде:

$$\sigma_B = 79,5 - 14,4 (C + 0,2 Si) + 3Mn + 2,5Q + 0,01 \Delta t_{неп.} \text{ [кг/мм}^2\text{];}$$

$$\sigma_{II} = 127,3 - 20,5 (C + 0,35 Si) + 8,5Q, \text{ [кг/мм}^2\text{];}$$

$$f = 14,1 - 4C - 5,6 Si + 1,9 C Si + 0,55Q + 0,7 Mn - 0,001 \Delta t_{неп.} \text{ [мм];}$$

$$L_{орг.} = 3,04 - 10,3 Si, \text{ [мм];}$$

$$HB_{30} = 410 - 55 (C + 0,46 Si) + 26 Mn + 0,004 \Delta t_{неп.} \text{ [МПа];}$$

$$HB_{100} = 340 - 55 (C + 0,33 Si) + 38 Mn, \text{ [МПа];}$$

$$K_{HB} = HB_{30} - HB_{100} = -70 - 7,15 Si - 12 Mn + 0,004 \Delta t_{неп.} \text{ [МПа];}$$

$$L_{гр}^{30} = -70 + 83 (C + 0,42 Si) - 59 Mn +$$

$$+ 40Q - 0,21 \Delta t_{неп.} \text{ [МКМ];}$$

$$L_{гр}^{100} = -521 + 22 (C + 0,34 Si) - 59 Mn, \text{ [МКМ];}$$

$$K_{гр.} = L_{гр}^{100} - L_{гр}^{30} = -451 - 61 C - 27,4 Si - 40Q + 0,21 \Delta t_{неп.} \text{ [МКМ];}$$

$$\Pi_{30} = 100, \text{ [%];}$$

$$\Pi_{100} = 90 - 5C - 20 Si + 34 Mn + 0,12 \Delta t_{неп.} \text{ [%];}$$

$$K_{II} = \Pi_{30} - \Pi_{100} = 10 + 5C + 20 Si - 34 Mn - 0,12 t_{неп.} \text{ [%].}$$

При этом, кроме уравнений всех указанных выше выходных данных, рассчитаны также уравнения квазиизотропии (K) по твердости, длине выделений графита и количеству перлита как разность этих величин в образцах 30 и 100 мм.

Анализ этих уравнений показывает, что основная характеристика чугуна – проч-

ность при растяжении, зависит, главным образом, от углеродного эквивалента. В полученном уравнении он имеет вид $C+0,2 Si$, что свидетельствует о более сильном влиянии углерода, чем в известной зависимости $C + 0,3 Si$, и по существу отражает влияние отношения C/Si . Действие марганца соответствует известным представлениям: равно по величине и противоположно по знаку действию кремния.

Количественная зависимость глубины отбела в этих исследованиях обнаружилась, главным образом, от содержания кремния.

В тонких сечениях отмечено 100%-е количество перлита. Из уравнения квазиизотропии $K_{II} = \Pi_{30} - \Pi_{100}$ видно, что с повышением содержания углерода и, особенно, кремния неравномерность в количестве перлита в сечениях разной толщины увеличивается, а перегрев и увеличение содержания марганца снижают ее.

Твердость чугуна определяется углеродным эквивалентом и содержанием марганца. Температура перегрева практически влияет на твердость только в тонких сечениях. Уравнение квазиизотропии твердости ($K_{HB} = HB_{30} - HB_{100}$) показывает, что повышение содержания кремния и марганца способствует выравниванию твердости в отливках разных толщин, перегрев же действует в обратном направлении.

Длина графитовых включений также больше зависит от углеродного эквивалента. Модифицирование сказывается наиболее заметно в тонких сечениях.

Таким образом, в дальнейших исследованиях для окончательного определения области оптимальных свойств чугуна было бы рационально уменьшить количество углерода и повысить содержание кремния. Перегрев оказал заметное действие, по возможности его увеличение ограничивается термостойкостью футеровки. Поэтому в дальнейших исследованиях перегрев составлял около 300 град над ликвидусом.



Список литературы

1. Лахтин Ю. М., Леонтева В. П. Материаловедение. – М.: Машиностроение, 1980. – 493 с.
2. Гусейнов Б. Г. Влияние параметров контролируемой плавки на плотность жидкого и твердого синтетического чугуна. – Баку, АзТУ. – 2005.
3. Гусейнов Б. Г., Бабанлы М. Б., Исмаилов Ф. С. Применение высококачественного синтетического чугуна взамен чугуна «нирезист» // Процессы литья. – 2011. – № 3. – С. 62-66.
4. Гашимов В. В., Чернова Н. А. Статические методы планирование экстремальных экспериментов. – М.: Наука, 1985.



References

1. Lakhtin Ju. M., Leonteva V. P. (1980). Materialovedenie. [Materials Science]. Moscow: Mashinostroeniie. [in Russian].
2. Guseinov B. G. (2005). Vliianie parametrov kontroliruemoi plavki na plotnost zhidkogo i tverdogo sinteticheskogo chuguna. [The impact of controlled fusion parameters on the density of the liquid and solid synthetic iron]. Baku, AzTU. [in Russian].
3. Guseinov B. G., Babanly M. B., Ismailov F. S. (2011). Primenenie vysokokachestvennogo sinteticheskogo chuguna vzamen chuguna «nirezist». [The use of high-quality synthetic iron instead of cast iron «nirezist»]. Protsessy lit'ia, no. 3 (87), pp. 62-66. [in Russian].
4. Gashimov V. V., Chernova N. A. (1985). Sticheskie metodi planirovaniia ekstremalnih eksperimentov [Statistical methods of planning of extreme experiments]. Moscow: «Nauka». [in Russian].

Поступила 07.12.2016