

**А. В. Зрайченко-Полозенцев,  
О. С. Коваль,  
Д. А. Дёмин**

## **ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ РЕЗЕРВОВ ПРОИЗВОДСТВА ПРИ ВЫПЛАВКЕ СИНТЕТИЧЕСКОГО ЧУГУНА**

*В статье описано применение интеллектуальной методологии исследования больших систем (ИМИБС) для обработки экспериментальных данных серийных промышленных плавок синтетического чугуна и синтеза на основе полученных результатов оптимального химического состава чугуна с заданным комплексом механических свойств.*

**Ключевые слова:** синтетический чугун, химический состав, механические свойства, большая система, математическое моделирование.

### **1. Введение**

Технологический аудит, по академику М. Д. Кацу, — это оценка потенциальных (скрытых) резервов действующего производства по экономическим, экологическим, потребительским и другим критериям (в том числе по заданному комплексу критериев), которые могут быть реализованы за счет оптимизации технологического режима на существующем оборудовании, с помощью существующих систем информационного обеспечения и управления, т. е. без дополнительных капитальных затрат.

Учитывая, что любой реальный промышленный технологический процесс описывается большим количеством характеризующих его переменных, он может быть представлен как большая система (БС). Для формализации его описания и решения последующей задачи выявления резервов производства необходима специальная методология, предложенная академиком Кацом М. Д. и названная интеллектуальной методологией исследования больших систем (ИМИБС). С помощью нее могут быть корректно решены 4 основные задачи изучения и совершенствования БС: идентификация (построение эмпирической модели по экспериментальным данным), диагноз состояния, прогноз поведения системы и оптимизация [1–4]. Применение данной методологии позволяет непосредственно в действующих производствах решать задачу построения математических моделей и оптимизации для нескольких выходных показателей. Такой подход интересен и для разработки новых сплавов и технологических процессов их плавки, и основан на реализации специального плана эксперимента. Этот план позволяет независимо от количества выходных показателей ( $Y$ ), при минимальном количестве опытов ( $N = 2n + 1$ , где  $n$  — количество входных параметров) определять

характер зависимости каждого из выходных показателей от каждого из входных параметров ( $X_i$ ): возрастающий (при увеличении значения  $X_i$ ), убывающий, экстремальный (экстремум max), экстремальный (экстремум min). С помощью этих зависимостей по каждому из  $X_i$  определяется направление, в котором следует двигаться для повышения значения выходных показателей.

Таким образом, под категорию БС попадает и синтетический чугун, выплавляемый в индукционных печах в литейных цехах промышленных предприятий. Данный объект представим «черным ящиком» и обладает следующими информационными характеристиками:

- высокой размерностью вектора входных параметров (количество элементов химического состава 5–10);
- существенной зависимостью выходного показателя (предела прочности и твердости) от входных параметров (элементов химического состава);
- высокой размерностью вектора выходных показателей.

При таком рассмотрении синтетического чугуна возможно построение модели, связывающей его химический состав с механическими свойствами — пределом прочности на растяжение и твердостью, и определение химического состава, обеспечивающего наилучшие показатели механических характеристик чугуна. Использование таких моделей позволит также решать задачу подбора количественного состава шихтовых материалов при минимуме затрат на шихту.

### **2. Постановка задачи исследования**

Целью исследования является получение математической модели, описывающей влияние

содержания химических элементов в чугуне на его механические свойства, последующая оптимизация и выявление резервов производства, заключающихся в возможности подбора такого количества ферросплавов, которое обеспечивало бы наилучшие показатели механических свойств при снижениях норм расхода дорогостоящих шихтовых материалов.

### 3. Объект и методы исследования

Объектом исследования является синтетический чугун, выплавляемый в чугунолитейном цехе ОАО «Кременчугский завод дорожных машин», предназначенный для изготовления отливок автомобильной и дорожной техники.

В качестве метода исследования выбрана интеллектуальная методология исследования больших систем. Применение такого метода обусловлено тем, что в ИМИБС все этапы построения математической модели формализованы, что гарантирует:

- Возможность формализовать постановку задачи — задача сводится к формулировке «установить зависимость выходного показателя (заданного комплекса выходных показателей) чугуна от входных параметров (содержания элементов химического состава).

- Возможность получения модели  $Y = F_i(X_i)$ , информация для построения которой может быть представлена в виде таблицы, в каждой строке которой зафиксированы значения всех заданных при постановке задачи входных параметров и выходных показателей в одной его реализации (промышленной плавке).

- Объективность получаемых зависимостей.

Инструментами исследования выбран метод восстановления одномерных зависимостей (МВОЗ) — метод построения математической модели, с помощью которой осуществляется редукция к элементным свойствам изучаемой системы — строится математическая модель  $Y = F_i(X_i)$ ,  $i = 1, n$ , описывающая зависимости выходного показателя ( $Y$ ) или комплекса выходных показателей ( $Y_k$ ) от каждого из  $n$  входных параметров ( $X_i$ ) изучаемого объекта. С помощью МВОЗ корректная формальная свертка множества частных выходных показателей в обобщенный критерий оценки эффективности работы осуществляется за счет перехода к измерению их значений в дискретных шкалах, а при построении математической модели осуществляется обратный переход к континуальным шкалам.

Исходными данными для реализации методологии является таблица экспериментального материала, в каждой строке которой содержатся значения входных параметров и выходных показателей, фиксируемых в каждой реализации изучаемого процесса в режиме его нормальной эксплуатации.

Задача построения модели решается поэтапно и включает следующие процедуры:

- свертка множества выходных показателей  $Y_j$  в обобщенный критерий оценки эффективности изучаемого технологического процесса  $Y_{об}$ ;

- построение зависимости обобщенного критерия от каждого из входных параметров изучаемого технологического процесса;

- проведение субоптимизации по модели, полученной на предыдущем шаге, заключающейся в определении диапазонов значения каждого входного параметра  $X_i$ , соблюдение которых обеспечит получение продукта, удовлетворяющего заданным ограничениям по каждому из выходных показателей.

Алгоритм построения зависимостей  $Y_{об} = F_i(X_i)$ ,  $i = 1, n$  в случае, если выходных показателей более одного, заключается в следующем [1].

#### 1. Свертка множества выходных показателей в обобщенный критерий.

Свертка осуществляется следующим образом. Для каждого частного выходного показателя  $Y_j$  задаются допустимые ограничения, выбираемые на основе технологической документации конкретного производства. Обобщенный показатель ( $Y_{об}$ ) принимает значения 1 («хорошо») в тех строках таблицы экспериментального материала, в которых каждый частный выходной показатель  $Y_j$  удовлетворяет заданным ограничениям, и значение 0 («плохо»), если хотя бы один из частных критериев не удовлетворяет заданным ограничениям.

#### 2. Алгоритм построения математической модели с помощью МВОЗ.

2.1. Таблицу исходных данных сортируют по возрастанию входного параметра  $X_1$ .

2.2. Диапазон вариаций параметра  $X_1$  делится на три поддиапазона из условия попадания в каждый поддиапазон одинакового (примерно одинакового) количества опытов. Границы поддиапазонов определяются как среднее между значениями в последнем опыте предыдущего и первом опыте последующего поддиапазонов.

2.3. Для каждого поддиапазона значения параметра  $X_1$  определяются средние значения ( $X_{1cp}D_1$ ,  $X_{1cp}D_2$ ,  $X_{1cp}D_3$ ).

2.4. В каждом поддиапазоне определяют соотношения:  $R_1 = m_1x/m_1$ ;  $R_2 = m_2x/m_2$ ;  $R_3 = m_3x/m_3$ , где  $m_1x$ ,  $m_2x$ ,  $m_3x$ , соответственно, количество «хороших» строк таблицы экспериментального материала в первом, втором и третьем поддиапазонах параметра  $X_1$ , а  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$  — общее количество строк, соответственно в первом, втором и третьем поддиапазонах параметра  $X_1$ .

2.5. По полученным по п. 2.3 и 2.4 координатам трех точек ( $X_{1cp}D_1$ ,  $R_1$ ;  $X_{1cp}D_2$ ,  $R_2$ ;  $X_{1cp}D_3$ ,  $R_3$ ) строят график зависимости обобщенного выходного показателя от 1-го входного параметра  $Y_{об} = F_1(X_1)$ .

2.6. Повторяют п.п. 2.1–2.5 последовательно для каждого из  $n$  входных параметров и получают

модель  $Y_{об} = F_i(X_i)$ ,  $i = 1, n$ , описывающую зависимости обобщенного критерия от каждого из  $n$  входных параметров.

**4. Экспериментально-промышленные исследования**

Таблица исходных данных для моделирования составлялась на основе результатов химических анализов и результатов проверки механических свойств образцов по стандартным методикам в серийных плавках ОАО «Кременчугский завод дорожных машин».

Выбор диапазонов содержания элементов химического состава чугуна (min-max) для каждого элемента приведен в табл. 1.

**Таблица 1**

Диапазоны (min-max) по содержанию элементов

$X_i$	$X_i$ min	гр <sub>1</sub>	гр <sub>2</sub>	$X_i$ max
$X_1$ — С	3,12	3,37	3,44	3,60
$X_2$ — Mn	0,47	0,62	0,68	0,83
$X_3$ — Si	1,86	2,33	2,50	2,85
$X_4$ — S	0,053	0,066	0,073	0,750
$X_5$ — P	0,068	0,085	0,103	0,143
$X_6$ — Cr	0,21	0,34	0,38	0,47
$X_7$ — Ni	0,15	0,18	0,19	0,20
$X_8$ — Ti	0,041	0,062	0,070	0,095
$X_9$ — Cu	0,10	0,22	0,29	0,43
$Y_2$ — HB	196	205	215	235

Исходные данные для построения одномерных зависимостей  $Y = F_i(X_i)$ ,  $i = 1, 9$ , приведены в табл. 2.

**Таблица 2**

Исходные данные для построения одномерных зависимостей  $Y = F_i(X_i)$

$X_i$	$X_{i,ср}D_1$	$X_{i,ср}D_2$	$X_{i,ср}D_3$	$Y_{ср}D_1$	$Y_{ср}D_2$	$Y_{ср}D_3$
$X_1$ — С	3,32	3,40	3,49	240	236	232
$X_2$ — Mn	0,55	0,65	0,74	240	239	230
$X_3$ — Si	2,20	2,41	2,64	237	235	236
$X_4$ — S	0,061	0,069	0,113	240	233	235
$X_5$ — P	0,077	0,091	0,119	232	230	246
$X_6$ — Cr	0,30	0,36	0,42	233	237	238
$X_7$ — Ni	0,17	0,18	0,19	232	236	243
$X_8$ — Ti	0,056	0,065	0,077	244	233	231
$X_9$ — Cu	0,18	0,26	0,34	236,0	236,3	235,6
$Y_2$ — HB	201	209	222	224	238	242

Оценка силы и резерва, вычисленная по описанной выше методологии, представлена в табл. 3–5.

**Таблица 3**

Оценка силы по  $X_i$  и резерва  $Y$  по каждому  $X_i$

$X_i$	Оценка $F$ — силы $X_i$	Оценка $R$ — резерва $Y$ по $X_i$
$X_1$ — С	8,1	3,8
$X_2$ — Mn	9,0	3,6
$X_3$ — Si	1,6	0,9
$X_4$ — S	6,8	4,1
$X_5$ — P	16,5	10,3
$X_6$ — Cr	5,0	2,3
$X_7$ — Ni	11,4	7,4
$X_8$ — Ti	12,8	7,8
$X_9$ — Cu	0,7	0,3
$Y_2$ — HB	18,1	6,2

**Таблица 4**

Ранжирование  $X_i$  по силе ( $F$ )

$X_i$	$F$	Ранг по $F$
$Y_2$ — HB	18,1	1
$X_5$ — P	16,5	2
$X_8$ — Ti	12,8	3
$X_7$ — Ni	11,4	4
$X_2$ — Mn	9,0	5
$X_1$ — С	8,1	6
$X_4$ — S	6,8	7
$X_6$ — Cr	5,0	8
$X_3$ — Si	1,6	9
$X_9$ — Cu	0,7	10

**Таблица 5**

Ранжирование  $X_i$  по величине резерва

$X_i$	$R$	Ранг по $R$
$X_5$ — P	10,3	1
$X_8$ — Ti	7,8	2
$X_7$ — Ni	7,4	3
$Y_2$ — HB	6,2	4
$X_4$ — S	4,1	5
$X_1$ — С	3,8	6
$X_2$ — Mn	3,6	7
$X_6$ — Cr	2,3	8
$X_3$ — Si	0,9	9
$X_9$ — Cu	0,3	10

Расчеты рекомендуемых диапазонов химических составов и количества несовпадающих кодов между оптимальной строкой, соответствующей модели, и каждой из строк исходной таблицы экспериментального материала приведены в табл. 6–7. Доказательство корректности модели приведено в табл. 8.

Таблица 6

Рекомендуемые диапазоны значений Xi

Xi	Рекомендуемый диапазон значений Xi
X1 — C	3,12—3,37
X2 — Mn	0,47—0,62
X3 — Si	1,86—2,33
X4 — S	0,053—0,066
X5 — P	0,103—0,143
X6 — Cr	0,38—0,47
X7 — Ni	0,19—0,20
X8 — Ti	0,041—0,062
X9 — Cu	0,22—0,29
Y2 — HB	215—235

Таблица 7

Определение количества несовпадающих кодов (РН)

пп	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	Y2	Коды		Y
	РН	РК											
56	1	3	3	3	3	3	3	1	3	3	4	16	290
57	2	3	2	1	3	3	2	1	3	3	5	22	285
33	1	1	1	2	2	1	1	3	1	2	7	57	270
30	2	1	2	1	3	1	2	1	2	2	5	21	265
53	3	1	2	1	1	3	2	2	1	2	7	46	265
37	1	2	1	1	2	2	2	3	1	3	6	39	260
50	2	1	1	3	3	1	1	2	2	1	6	54	255
45	2	1	2	3	3	3	3	3	2	2	5	27	255
36	1	2	1	1	3	3	3	3	1	3	3	14	255
9	1	2	1	1	2	2	1	2	2	3	5	41	255
55	2	2	1	3	3	3	3	1	1	3	4	10	255
44	3	1	1	2	3	3	3	1	2	2	3	19	250
32	1	1	1	3	2	2	2	3	2	2	6	48	250
4	3	2	3	1	1	1	1	3	3	3	8	54	250
15	1	2	3	1	1	3	2	1	1	2	6	28	245
26	1	1	2	3	2	3	2	1	2	3	4	31	245
11	2	3	3	3	2	3	2	1	3	3	7	43	245
34	2	2	3	3	2	2	2	1	1	1	9	54	240
43	3	3	2	1	3	1	2	2	1	1	8	60	240
28	3	1	2	2	1	1	1	2	3	1	9	77	240
22	1	3	3	2	1	1	1	2	3	1	9	77	240
52	3	1	3	2	1	1	1	1	1	2	8	51	240
16	1	1	3	1	1	2	3	1	1	2	5	21	240
51	2	1	1	3	3	1	1	2	2	2	6	40	240
39	2	2	2	2	3	1	1	3	2	2	8	45	240
29	1	3	2	2	1	1	1	2	3	2	9	64	240
10	1	2	1	2	2	1	2	1	2	2	6	40	240
48	3	3	1	1	3	3	2	3	3	2	6	42	240
2	3	3	2	3	2	2	2	2	2	3	8	60	240

Окончание табл. 7

пп	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	Y2	Коды		Y
	РН	РК											
12	2	3	3	3	1	3	3	1	3	3	6	34	240
49	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3	6	39	240
42	3	2	2	1	3	1	1	1	1	1	7	45	235
46	3	3	3	2	3	3	2	1	2	2	6	36	235
47	3	2	3	3	3	3	3	1	3	2	6	20	235
8	3	2	3	2	1	2	2	2	1	2	10	55	235
38	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	8	58	230
41	3	2	2	3	3	2	2	3	1	2	9	42	230
19	1	2	2	1	1	2	1	3	2	2	7	46	230
7	3	3	1	1	1	3	2	2	3	3	6	50	230
27	1	1	2	3	2	2	2	2	2	3	6	43	230
59	1	1	3	2	3	2	1	1	1	3	5	21	230
58	2	1	3	2	1	1	1	1	1	1	8	61	225
31	1	1	3	1	3	1	1	1	1	1	5	36	225
40	3	2	3	1	3	3	3	3	2	2	5	26	225
21	1	1	1	2	2	1	1	3	2	2	6	56	220
24	1	3	3	2	2	3	3	2	1	2	7	48	220
20	1	2	1	2	1	2	2	3	2	3	6	44	220
13	1	3	2	1	2	1	1	3	3	3	7	57	220
17	3	3	1	3	2	1	1	3	2	1	8	86	215
5	2	3	2	1	2	2	3	2	3	1	8	62	215
25	3	1	2	3	2	1	1	1	3	1	8	67	210
6	3	3	2	1	1	1	1	3	3	1	9	81	210
23	1	2	3	2	2	3	2	3	1	2	8	49	210
1	2	3	2	3	1	1	1	2	2	2	9	65	210
14	2	3	1	1	1	3	2	2	3	3	6	46	210
18	2	1	1	2	2	1	1	3	2	1	7	74	205
35	2	3	3	3	2	3	2	3	1	1	9	74	205
3	3	3	2	3	1	3	2	3	3	1	9	78	200
54	3	3	1	3	2	3	2	2	1	3	7	57	200

Таблица 8

Доказательство корректности модели

NN	РН_усп	РК_усп	Y_усп
1...10	5,3	34	266
1...20	5,9	38	256
1...30	6,3	41	251
1...40	6,5	42	246
1...50	6,5	43	241
1...59	6,7	47	236
50...59	8,0	65	208

На рис. 1–9 показаны зависимости предела прочности синтетического чугуна от содержания элементов химического состава, полученные на основе методологии моделирования БС.

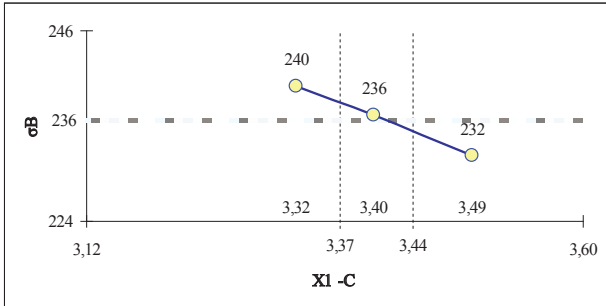


Рис. 1. Зависимость предела прочности синтетического чугуна от содержания углерода

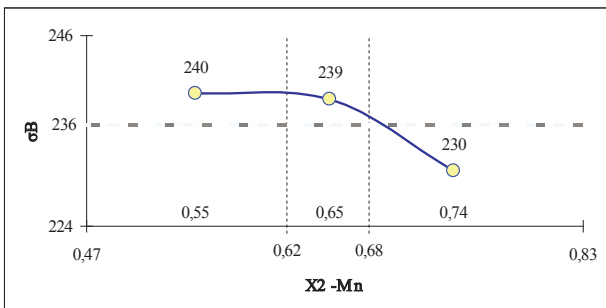


Рис. 2. Зависимость предела прочности синтетического чугуна от содержания марганца

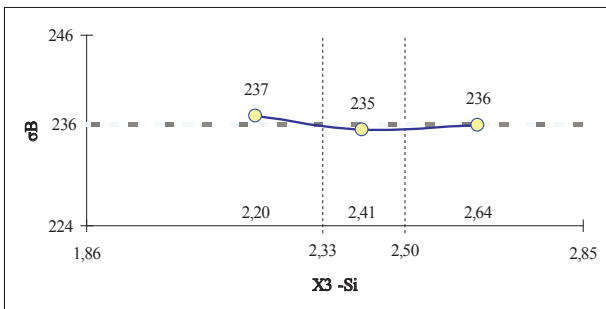


Рис. 3. Зависимость предела прочности синтетического чугуна от содержания кремния

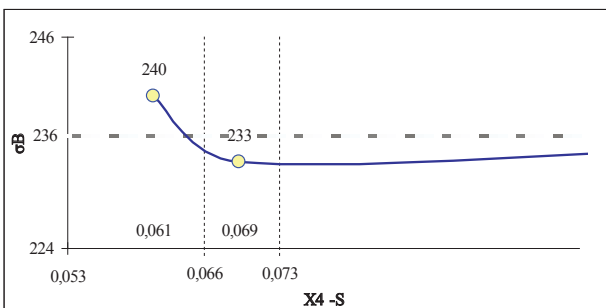


Рис. 4. Зависимость предела прочности синтетического чугуна от содержания серы

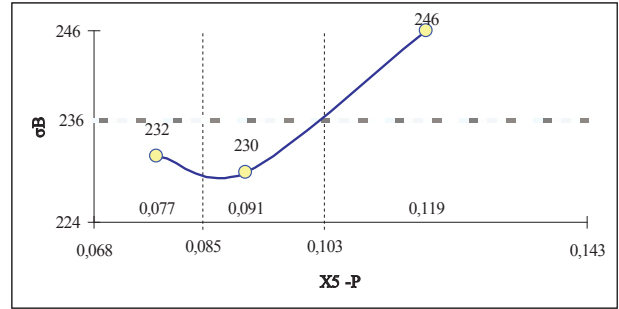


Рис. 5. Зависимость предела прочности синтетического чугуна от содержания фосфора

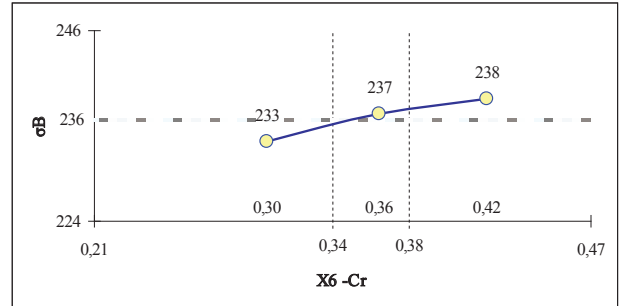


Рис. 6. Зависимость предела прочности синтетического чугуна от содержания хрома

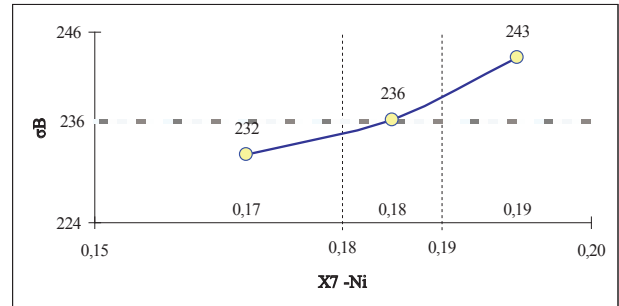


Рис. 7. Зависимость предела прочности синтетического чугуна от содержания никеля

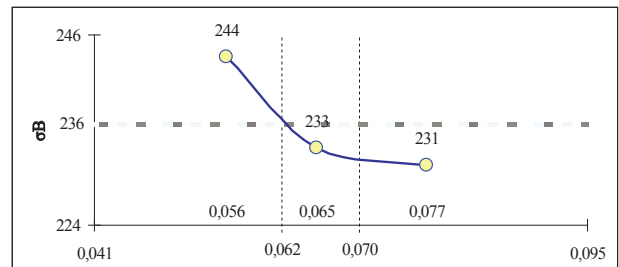


Рис. 8. Зависимость предела прочности синтетического чугуна от содержания титана

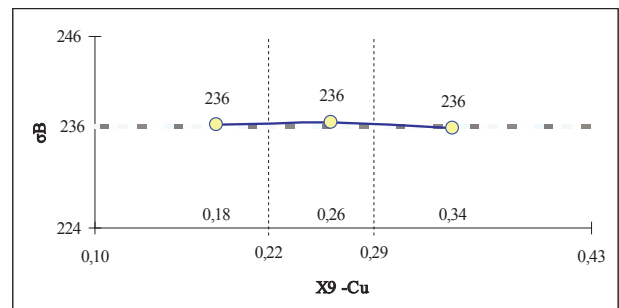


Рис. 9. Зависимость предела прочности синтетического чугуна от содержания меди

### 5. Синтез оптимального химического состава синтетического чугуна

На рис. 10–13 проиллюстрировано подтверждение корректности полученных моделей.

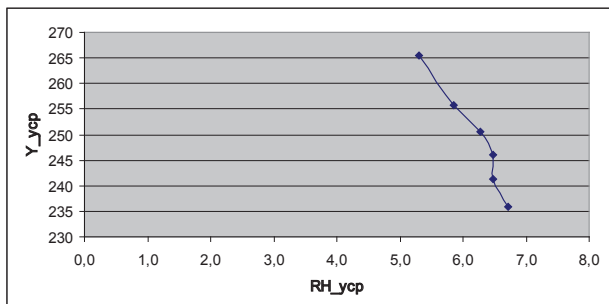


Рис. 10. Определение количества несовпадающих кодов

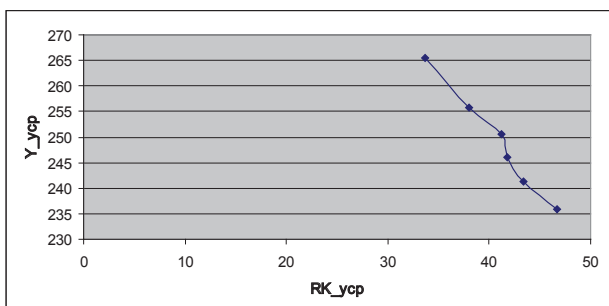


Рис. 11. Определение количества несовпадающих кодов

Таким образом, модель субоптимального химического состава синтетического чугуна, обеспечивающего максимум предела прочности на растяжение, имеет вид:

$$Y \rightarrow Y_{\max},$$

если:

$$X_1 D_1 * X_2 D_1 * X_3 D_1 * X_4 D_1 * X_5 D_3 * X_6 D_3 * X_7 D_3 * X_8 D_1 * X_9 D_2 * X_{10} D_3. \quad (1)$$

Эта запись означает, что при расчете шихты нужно исходить из того, что содержание углерода в чугуне должно быть в поддиапазоне  $D_1$  «и» содержание марганца в поддиапазоне  $D_1$  «и» содержание кремния в поддиапазоне  $D_1$  «и» содержание хрома в поддиапазоне  $D_3$  «и» т. д.» При этом содержание серы в готовом чугуне должно обязательно попадать в поддиапазон  $D_1$ , а содержание фосфора — в поддиапазон  $D_3$ .

Таким образом, полученная формула позволяет синтезировать чугун с наилучшими показателями предела прочности на растяжение.

Учитывая, что вторым важным показателем качества чугуна является твердость, представляет большой практический интерес определение химического состава чугуна, обеспечивающего максимум отношения предела прочности к твердости (предел

прочности при этом должен быть максимальным, а твердость — минимальной).

Зависимость предела прочности от твердости, построенная по таблице экспериментальных данных, представлена на рис. 12.

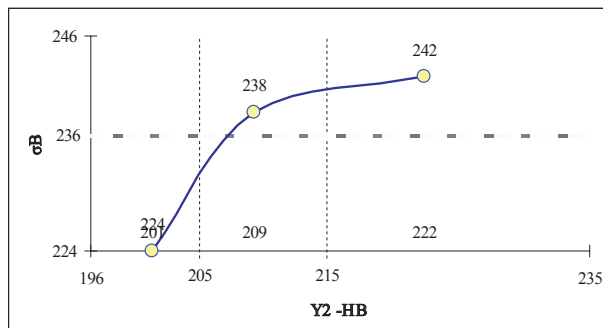


Рис. 12. Зависимость предела прочности синтетического чугуна от его твердости

Из рис. 12 следует, что предел прочности растет с увеличением твердости. Это не противоречит известному факту, однако следует учитывать, что эта зависимость не является линейной, как приводится обычно в литературе. Фактическая нелинейность зависимости объясняется тем, что элементы химического состава чугуна по-разному влияют на два этих свойства — прочность зависит главным образом от графитовой фазы, а твердость — от металлической матрицы структуры чугуна. Поэтому, начиная с HВ209, влияние твердости на предел прочности становится незначимым.

Исходные данные для реализации метода интегральной свертки и получения модели влияния химического состава на обобщенный показатель качества (отношение предела прочности к твердости) представлен в табл. 9–10).

Таблица 9

Деление диапазонов вариации входных параметров на 3 поддиапазона

$X_i$	$X_i \min$	гр <sub>1</sub>	гр <sub>2</sub>	$X_i \max$
$X_1$ — С	3,12	3,37	3,44	3,60
$X_2$ — Mn	0,47	0,62	0,68	0,83
$X_3$ — Si	1,86	2,33	2,50	2,85
$X_4$ — S	0,053	0,066	0,073	0,750
$X_5$ — P	0,068	0,085	0,103	0,143
$X_6$ — Cr	0,21	0,34	0,38	0,47
$X_7$ — Ni	0,15	0,18	0,19	0,20
$X_8$ — Ti	0,041	0,062	0,070	0,095
$X_9$ — Cu	0,10	0,22	0,29	0,43

Таблица 10

Исходные данные  
для построения одномерных зависимостей  $Y = F_i(X_i)$ ,  $i = 1, 9$

$X_i$	$X_{i\text{ср}D_1}$	$X_{i\text{ср}D_2}$	$X_{i\text{ср}D_3}$	$Y_{\text{ср}D_1}$	$Y_{\text{ср}D_2}$	$Y_{\text{ср}D_3}$
$X_1$ — С	3,32	3,40	3,49	1,1233	1,1232	1,109
$X_2$ — Mn	0,55	0,65	0,74	1,149	1,127	1,084
$X_3$ — Si	2,20	2,41	2,64	1,115	1,125	1,115
$X_4$ — S	0,061	0,069	0,113	1,135	1,115	1,105
$X_5$ — P	0,077	0,091	0,119	1,108	1,090	1,158
$X_6$ — Cr	0,30	0,36	0,42	1,133	1,111	1,107
$X_7$ — Ni	0,17	0,18	0,19	1,120	1,109	1,133
$X_8$ — Ti	0,056	0,065	0,077	1,143	1,107	1,105
$X_9$ — Cu	0,18	0,26	0,34	1,120	1,128	1,105

Графики полученных зависимостей обобщенного показателя качества от содержания основных элементов химического состава показаны на рис. 13–19.

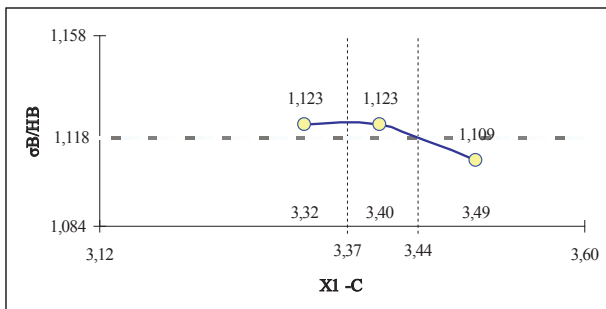


Рис. 13. Зависимость обобщенного показателя качества синтетического чугуна от содержания углерода

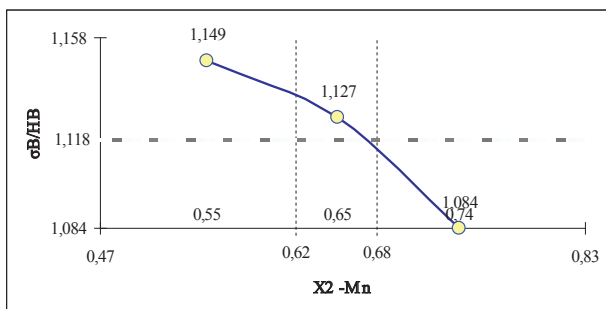


Рис. 14. Зависимость обобщенного показателя качества синтетического чугуна от содержания марганца

Рис. 13–19 позволяют выявить, какой из элементов химического состава оказывает преобладающее влияние на графитообразование, а какой на формирование матрицы. Это позволяет в более полной степени решать задачу управления свойствами чугуна путем регулирования его микроструктуры.

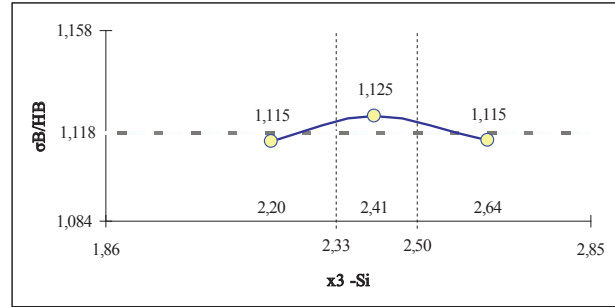


Рис. 15. Зависимость обобщенного показателя качества синтетического чугуна от содержания кремния

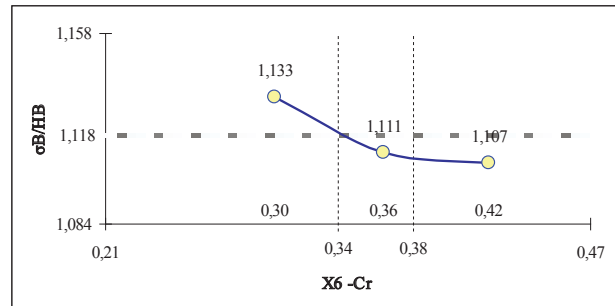


Рис. 16. Зависимость обобщенного показателя качества синтетического чугуна от содержания хрома

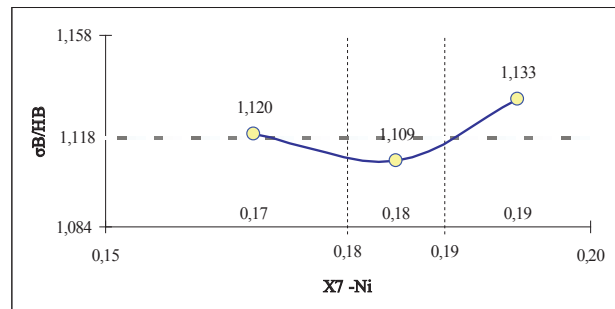


Рис. 17. Зависимость обобщенного показателя качества синтетического чугуна от содержания никеля

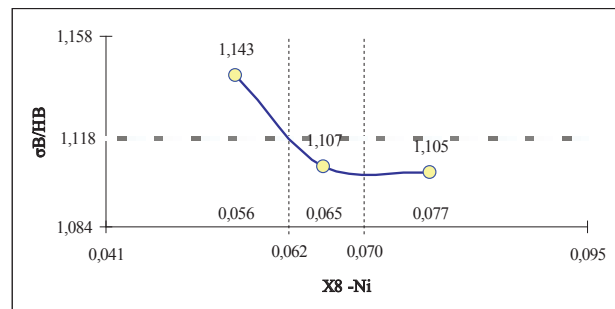


Рис. 18. Зависимость обобщенного показателя качества синтетического чугуна от содержания титана

Таким образом, для получения лучших значений обобщенного показателя качества, химический состав чугуна должен подбираться по формуле:

$$X_1D_1 * X_2D_1 * X_3D_2 * X_4D_1 * X_5D_3 * X_6D_1 * X_7D_3 * X_8D_1 * X_9D_2, \quad (2).$$

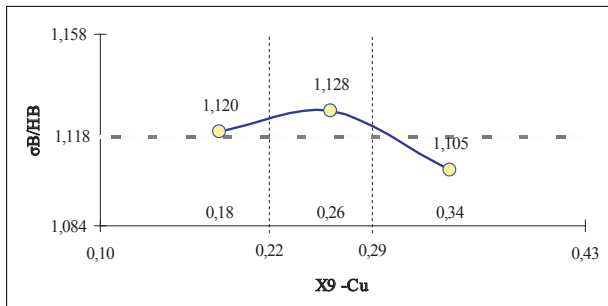


Рис. 19. Зависимость обобщенного показателя качества синтетического чугуна от содержания меди

**Выводы**

1. Результаты исследований влияния химического состава синтетического чугуна на его механические свойства могут быть использованы для синтеза оптимального состава чугуна.
2. Математическая модель для синтеза оптимального состава чугуна по пределу прочности имеет вид:

$$Y \rightarrow Y_{max},$$

если:

$$X_1D_1 * X_2D_1 * X_3D_1 * X_4D_1 * X_5D_3 * X_6D_3 * X_7D_3 * X_8D_1 * X_9D_2 * X_{10}D_3.$$

3. Математическая модель для синтеза оптимального состава чугуна по обобщенному показателю качества имеет вид:

$$Y \rightarrow Y_{max},$$

если:

$$X_1D_1 * X_2D_1 * X_3D_2 * X_4D_1 * X_5D_3 * X_6D_1 * X_7D_3 * X_8D_1 * X_9D_2.$$

4. Применение зависимостей, полученных математическим моделированием по методологии исследования БС, и соответствующих графиков, позволяет выявить, какие из элементов химического состава оказывают преобладающее влияние на графитизацию, а какие — на формирование матрицы синтетического чугуна. Это позволяет эффективно воздействовать на формирование структуры чугуна, регулируя данный процесс за счет комплексного легирования и модифицирования синтетического чугуна.
5. Полученные результаты могут быть использованы в реальном промышленном производстве, в частности для подбора компонентов шихты, обеспечивающих при выплавке чугуна лучшие показатели его механических свойств.

**Литература**

1. Давиденко А. М. Новые методы изучения действующих производств и их возможности [Текст] / А. М. Давиденко, М. Д. Кац // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2004. — № 6(12). — С. 189–193.
2. Кац М. Д. Методология разработки новых композиционных материалов, обладающих заданным комплексом физико-химических (потребительских) свойств [Текст] / М. Д. Кац, А. М. Давиденко // Вестник ХГПУ. — 2000. — Выпуск № 104. — С. 98–103.
3. Кац М. Д. Использование методов идентификации и субоптимизации для повышения эффективности действующих металлургических производств [Текст] / М. Д. Кац, А. М. Давиденко // Металлургическая и горнорудная промышленность. — 1999. — № 2–3. — С. 86–88.
4. Сталинский Д. В. Возможности интеллектуальной технологии изучения и оптимизации металлургических производств [Текст] / Д. В. Сталинский, М. Д. Кац, С. П. Диденко, А. М. Давиденко // Сталь. — 2001. — № 5. — С. 77–80.

**ОЦІНКА ПОТЕНЦІЙНИХ РЕЗЕРВІВ ВИРОБНИЦТВА ПРИ ВИПЛАВЦІ СИНТЕТИЧНОГО ЧАВУНУ**

**О. В. Зрайченко-Полозенцев, О. С. Коваль, Д. О. Дьомін**

У статті описано застосування інтелектуальної методології дослідження великих систем (ІМДВС) для обробки експериментальних даних серійних промислових плавок синтетичного чавуну і синтезу на основі отриманих результатів оптимального хімічного складу чавуну з заданим комплексом механічних властивостей.

**Ключові слова:** синтетичний чавун, хімічний склад, механічні властивості, велика система, математичне моделювання.

*Олексій Володимирович Зрайченко-Полозенцев, здобувач кафедри ливарного виробництва Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».*

*Оксана Сергіївна Коваль, аспірант кафедри ливарного виробництва Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».*

*Дмитро Олександрович Дьомін, кандидат технічних наук, професор кафедри ливарного виробництва Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*

**EVALUATION OF POTENTIAL RESERVES OF PRODUCTION FOR MELTING SYNTHETIC IRON**

**A. Zraychenko-Polozentsev, O. Koval, D. Domin**

The article describes the use of intellectual research methodology of large systems (IRMLS) for experimental data of



industrial production batches of synthetic iron and synthesis based on the results of optimal chemical composition of cast iron with a given set of mechanical properties.

**Key words:** synthetic iron, chemical composition, mechanical properties, a large system, mathematical modeling.

*Alex Zraychenko-Polozentsev, the applicant department foundry, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute. Oksana Koval, graduate student of foundry, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute».*

*Dmytro Domin, Ph. D., professor Department of Foundry, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»*

**Адрес для переписки:**

61002, г. Харьков, ул. Фрунзе, 21  
Национальный технический университет  
«Харьковский политехнический институт»  
Кафедра «Литейное производство»  
E-mail: nauka@jet.com.ua

УДК 519.681

Д. А. Дёмкин

## МЕТОДОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛА ДЛЯ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПЛАВКОЙ

*В статье описана методология формирования функционала для расчета оптимального управления электроплавкой на основе двух альтернативных соображений — максимизации производительности оборудования и минимизации затрат при его функционировании. Предложена методология расчета оптимального управления процессом электроплавки на основе представления печи как элемента системы массового обслуживания «печь — литейный конвейер».*

**Ключевые слова:** функционал, система массового обслуживания, оптимальное управление, электродуговая плавка.

### 1. Введение

Технологический процесс электроплавки, как сложная динамическая система, характеризуется изменением своих состояний во времени. Каждое из состояний описывается группой факторов, определение которых по ходу плавки с помощью статистических и теоретико-информационных методов исследований должно позволять решать поставленную задачу управления — выдерживание каждого заданного параметра процесса в нужном диапазоне в течение всего периода плавки при минимальных энерго- и ресурсозатратах.

Специфической особенностью плавки, как объекта управления, является то, что отклонения от нормального хода процесса в любой момент времени могут быть вызваны не только объективными факторами, но и ошибками обслуживающего персонала, осуществляющего субъективный контроль за ходом технологического процесса. Кроме этого, современное состояние плавильного оборудования, используемого в цехах отечественных предприятий, может быть охарактеризовано как «состояние физического и морального износа». Основным путем

борьбы за качество литейной и металлургической продукции является модернизация в первую очередь систем управления. Однако на этом пути стоят объективные трудности. В частности, отсутствуют математические модели, позволяющие описывать параметры процессов электроплавки с учетом различных особенностей промышленного производства, а также методология получения моделей для алгоритмов управления электродуговой плавкой. По этой причине управление качеством получаемого сплава в существующих системах управления не закладывается, и ограничиваются, как правило, качественными оценками протекающих в печи процессов. В этой связи представляется актуальной проблема совершенствования процессов и систем управления электроплавкой.

### 2. Цель и задачи исследования

Для совершенствования процессов управления плавкой, в первую очередь, необходимо сформулировать задачу управления плавкой как сложным, стохастическим процессом. Постановка задачи управления, при этом, может быть сведена к решению следующих вопросов: