

**ПРИМЕНЕНИЕ ПЛАНИРОВАНИЯ ПО СХЕМЕ ПОЛНОГО
ФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ
СОСТАВА И СВОЙСТВ ОТЛИВОК
ИЗ ПОЛОВИНЧАТЫХ ЧУГУНОВ**

Аннотация. Решение задачи сочетания в отливках из чугуна определенного комплекса эксплуатационных свойств, таких как износостойкость, коррозионная стойкость и жаростойкость сопряжено со значительными трудностями, так как повышение уровня одного из свойств может вызывать снижение остальных или некоторых из них. Для решения такой компромиссной задачи было применено математического планирования эксперимента. Благодаря которому получена максимальная информация об объекте исследования (многокомпонентном сплаве) при минимальном количестве опытов. При этом на объект оказывали действие многие факторы – химический состав сплава, его легирование и модифицирование. Получено математическое описание влияния каждого фактора на функцию оптимизации. В результате проведенных исследований установлено, что комплексу необходимых свойств отвечали сплавы, содержащие 6,0 % алюминия и модифицированные комплексом $Se + TiCN + SiC$.

В области литейного производства созданы физико-химические основы технологических процессов и проводятся научные исследования по изучению основных закономерностей процессов плавки, легирования, модифицирования черных и цветных сплавов. Дальнейшие фундаментальные работы направлены на исследование процессов структурообразования в модифицированных чугунах и сталях и создание на этой основе прогрессивной теории формирования их структуры [1, 2, 3]. Также претерпел значительные качественные изменения методологический, технический и аппаратурный арсенал средств научных исследований.

Анализ состояния вопроса. Ранее повышение качества отливок реализовывали путем все более значительного и не всегда обоснован-

ного легирования, используя такие дефицитные для Украины и дорогостоящие элементы, как Mo, V, Cr, Ni, Nb, W и др., запасы которых не восполняются. Для современных чугунов желательным является легирование и модифицирование теми элементами, сырье для которых имеется в Украине. При этом содержание дефицитных компонентов надо сводить к минимуму и исследовать возможность комплексного легирования малодефицитными экономичными элементами, к числу которых относятся алюминий, титан, кремний, хром и др. [4, 5].

Отливки из чугуна сочетающего определенный комплекс эксплуатационных свойств, таких как износостойкость, коррозионная стойкость и жаростойкость необходимы для: оснастки при литье по выплавляемым моделям, деталей печного оборудования, деталей коксохимического оборудования, изложниц, тиглей для плавки и многих других. Решение подобной задачи сопряжено со значительными трудностями, так как повышение уровня одного из свойств может вызывать снижение остальных или некоторых из них [6, 7].

Для решения такой компромиссной задачи – получения комплекса трудно сочетаемых свойств материала – необходимо применение математического планирования эксперимента, которое обусловлено необходимостью повышения экономической и научной эффективности проводимых исследований. Это позволяет не только свести до минимума трудозатраты для получения необходимой научной или технологической информации, но и обеспечить ее оптимальный для данных условий вариант, а при необходимости и получить расчетный аппарат в виде математического описания исследуемого процесса.

Цель настоящих исследований. Применение математического планирования эксперимента для эффективного выполнения поисковых многофакторных исследований легирования и модифицирования белых и половинчатых чугунов с целью получения прогнозируемого комплекса износостойкости, жаростойкости и коррозионной стойкости отливок. Задача планирования эксперимента состояла в математическом описании влияния каждого фактора на функцию оптимизации.

В качестве исходной лигатуры использовали чугун следующего химического состава (% , по массе): углерод 2,8 – 2,9; марганец 0,40 – 0,45; кремний 0,70 – 0,75; хром 0,09 – 0,10; ферроцерий 0,3 (по

присадке). Содержание алюминия и модифицирующих присадок варьировали в интервале: Al от 2,0 до 6,0 %; TiCN от 0,0 до 0,1 %; SiC от 0,0 до 0,05 %.

Подматрица планирования ПФЭ, в том числе и в натуральном масштабе при трех факторах, варьируемых на двух уровнях, приведена в табл. 1. На практике использовали прием рандолизации, порядковый номер очередного опыта выбирали случайным образом. Тем самым оказалось возможным избежать систематических ошибок при проведении эксперимента (дрейф характеристик во времени).

Таблица 1

Подматрица планирования ПФЭ

Номер опыта	Номер плавки	Кодированные значения факторов			Натуральный масштаб, % по массе		
		X ₁	X ₂	X ₃	SiC	TiCN	Al
1	2	-	-	+	0,05	0,1	6,0
2	4	+	-	-	-	0,1	6,0
3	6	-	+	-	0,05	-	6,0
4	8	+	+	+	-	-	6,0
5	1	-	-	-	0,05	0,1	2,0
6	7	+	-	+	-	0,1	2,0
7	3	-	+	+	0,05	-	2,0
8	5	+	+	-	-	-	2,0

В соответствии с поставленными задачами исследований, сформулировали основные требования к отливкам, работающим при высоких температурах в коррозионно-абразивной среде (табл. 2). Состав чугуна считали оптимизированным, если он отвечал приведенному комплексу свойств.

Для описания исследуемого объекта выбрали математическую модель, содержащую линейные члены и взаимодействия первого порядка. Уравнение регрессии имеет следующий вид:

$$Y = A_0 + A_1x_1 + A_2x_2 + A_3x_3 + A_4x_1x_2 + A_5x_1x_3 + A_6x_2x_3 + A_7x_1x_2x_3 \quad (1)$$

где Y - целевая функция;

A₀ ... A₇ - выборочные коэффициенты регрессии.

В настоящей статье в качестве примера рассмотрим микротвердость структурных составляющих и твердость отливок из экспериментальных чугунов (табл. 3). На основе этих данных определяли

коэффициенты регрессии (табл. 4). Подставляя полученные коэффициенты в модельное уравнение (1), получали математическое описание изучаемого свойства. Отсевание коэффициентов регрессии осуществляли по результатам вычисления доверительного интервала, который должен быть меньше коэффициента регрессии в случае значимого влияния данного фактора на исследуемый параметр.

Таблица 2

Основные требования к экспериментальным чугунам

Параметр	Величина параметра	
	допустимая	желательная
Обязательные свойства		
Жаростойкость при 900 °С, г/(м ² час) 750 °С, г/(м ² час)	не более 0,5	0,4 – 0,5
Скорость коррозии в 5 %-ной серной кислоте (Км-), г/(м ² час)	менее 0,030	0,025 – 0,010
Коэффициент относительной износостойкости, К1: абразив песок абразив карбид кремния	не менее 3,5 не менее 2,5	4,0 – 4,5 3,0 – 3,5
Желательные свойства		
Микротвердость карбидной составляющей, МПа	не менее 7000	7500 – 9000
Микротвердость металлической матрицы, МПа	не менее 4000	5000 – 7000
Твердость, НВ	не менее 300	450 – 490
Прочность (σ_b), МПа	не менее 350	500 – 600
Плотность, кг/м ³	не менее 6500	6900 – 7200

Таблица 3

Свойства отливок из комплексно модифицированных и легированных алюминием чугунов

№№ плавки	Микротвердость карбидной составляющей, МПа	Микротвердость металлической матрицы, МПа	Твердость, НВ
8	7389	4659	490
3	7180	7101	350
7	7969	4540	289
2	8933	6145	367
5	9451	6600	324
6	10719	6035	492
4	8263	5683	365
1	10105	6691	472

Коэффициенты регрессии

Параметр	A ₀	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇
Микротвердость карбидной составляющей, МПа	8751,1 3	- 483,13	- -	- 883,38	218,38	294,38	- 516,88	- -
Микротвердость металлической матрицы, МПа	5931,7 5	- 561,25	167	-320,5	-	-450,5	101,75	- 301,25
Твердость, НВ	393,63	-26,63	20,38	-19,63	19,63	42,13	25,63	34,88

В результате анализа регрессионных зависимостей влияния легирования алюминием и комплексного модифицирования на микротвердость структурных составляющих экспериментальных чугунов установлено следующее. Изменение количества и состава структурных составляющих привело к изменению свойств чугуна. С увеличением количества алюминия микротвердость карбидной фазы и эвтектоида незначительно снизилась на 20 и 8 % соответственно, также уменьшилась и твердость отливок с 472 до 367 НВ. Полученное распределение, форма и размеры карбидной фазы в отливках с 5,98 – 6,0 % Al и образование легированного эвтектоида, благоприятно повлияли на свойства чугуна: сохранился достаточно высокий общий уровень твердости и микротвердости, а свойства отдельных структурных составляющих выравнялись.

Зависимости микротвердости карбидной составляющей (H₅₀KС), полученные в результате регрессионного анализа показаны на рис. 1. Влияние модифицирующих добавок изменяется при увеличении содержания алюминия. При 2 % Al (см. рис. 1, а) карбонитрид титана положительно влияет на микротвердость цементита при уменьшении количества SiC. Влияние TiCN при 4% алюминия уменьшается и преобладающим становится воздействие карбида кремния (см. рис. 1, б). Микротвердость карбидной составляющей при 6% Al уменьшается с увеличением концентрации обеих модифицирующих добавок (см. рис. 1, в).

Различное влияние модифицирования TiCN и SiC при разном содержании алюминия оказывает влияние и на микротвердость металлической матрицы (H_{50MM}). Результаты регрессионного анализа показаны на рис. 2. В табл. 3 приведено среднее значение микротвердости перлита, но он отличался значительной неоднородностью.

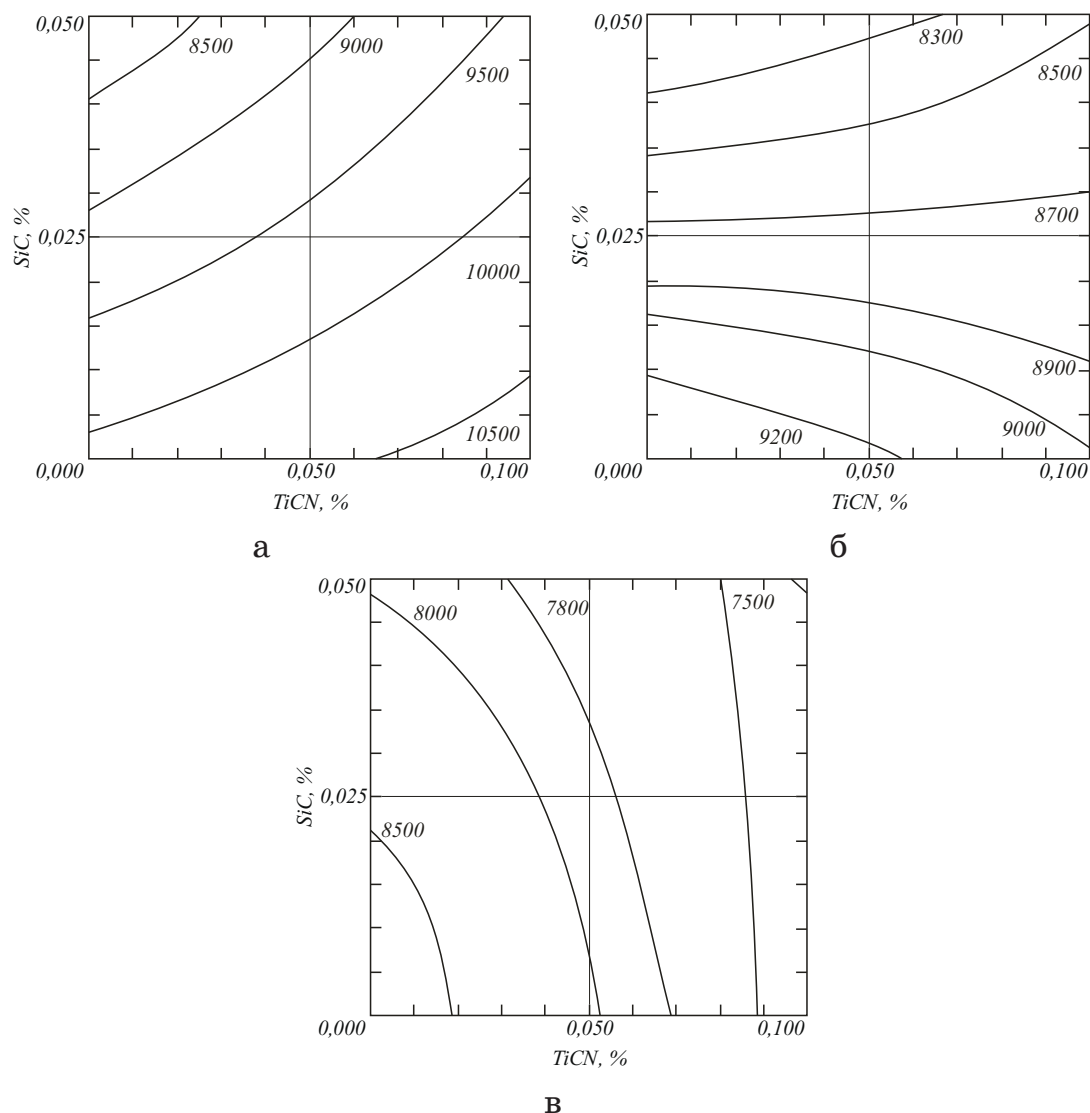


Рисунок 1 – Двумерное сечение поверхности отклика зависимости:
а - $H_{50KС} = f(TiCN, SiC)$ при 2 % Al; б - $H_{50KС} = f(TiCN, SiC)$ при 4 % Al; в - $H_{50KС} = f(TiCN, SiC)$ при 6 % Al

При небольшом содержании алюминия перлит был трех основных типов с микротвердостью – 6006, 5749 и 3173 МПа. С увеличением количества Al однородность эвтектоида повысилась, но среднее значение H_{μ} стало ниже 4540 МПа. Значения микротвердости металлической матрицы при 2 % алюминия имеют две области максимальных значений при низкой (0,013 % SiC; 0,04 % TiCN) и высокой

(0,038 % SiC; 0,04 % TiCN) концентрации модифицирующих добавок. При содержании алюминия 2...4 % с увеличением количества TiCN микротвердость эвтектоидной составляющей увеличилась на 15 %, увеличение содержание SiC снижает этот показатель.

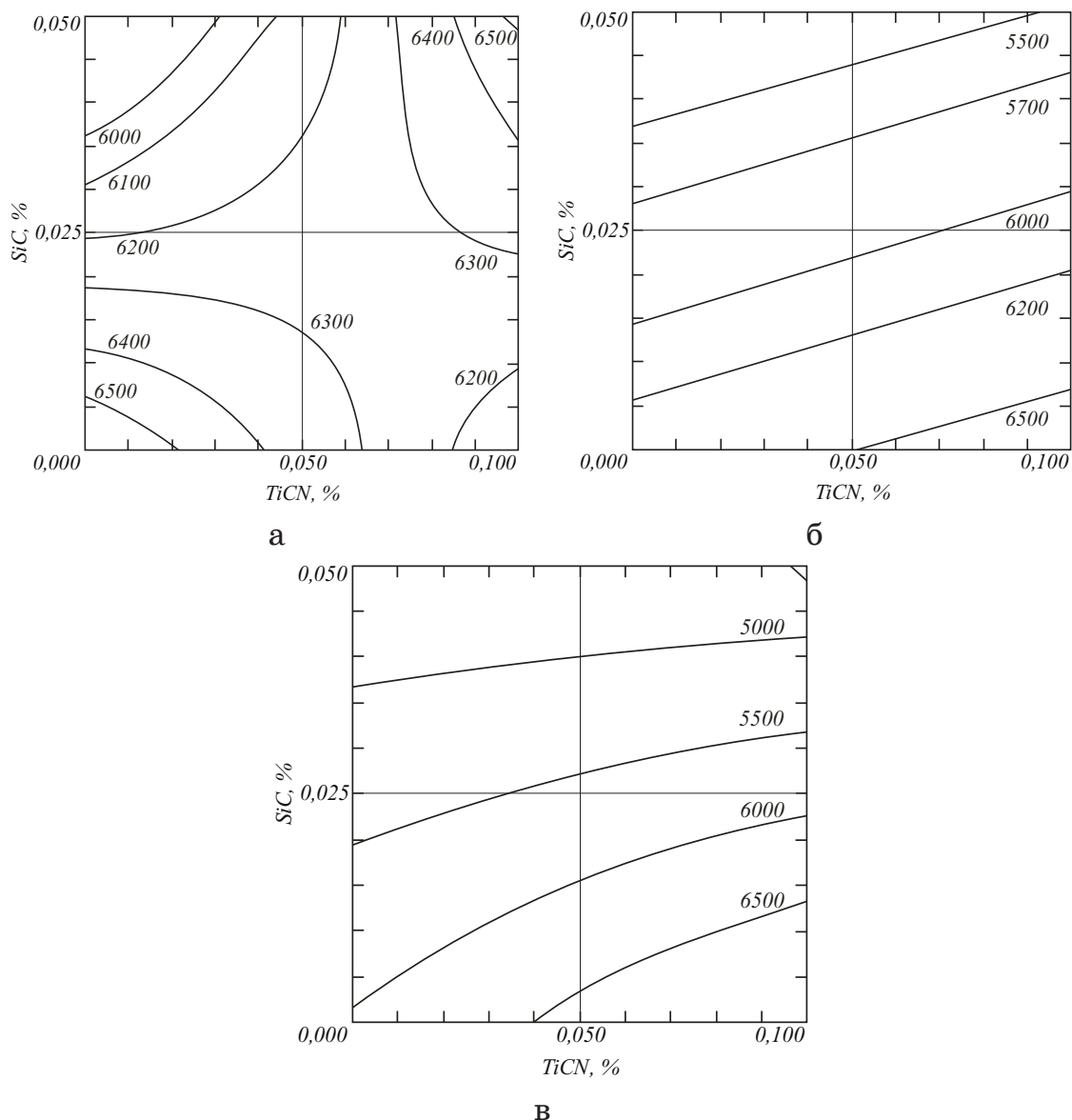


Рисунок 2 – Двумерное сечение поверхности отклика зависимости:
 а - $H_{50MM} = f(TiCN, SiC)$ при 2 % Al; б - $H_{50MM} = f(TiCN, SiC)$
 при 4 % Al; в - $H_{50MM} = f(TiCN, SiC)$ при 6 % Al

В результате анализа регрессионных зависимостей влияния легирования алюминием и комплексного модифицирования на твердость слитков экспериментальных чугунов установлено, что при содержании алюминия 2 % основное влияние на твердость оказывает содержание карбида кремния, твердость возрастает с уменьшением

его содержания, влияние карбонитрида титана незначительно (рис. 3). С увеличением концентрации алюминия до 4 % эффект от влияния TiCN на твердость возрастает, при этом рост твердости происходит с уменьшением содержания карбида кремния и увеличением содержания карбонитрида титана (рис. 3, б). При увеличении содержания алюминия до 6% увеличение твердости происходит при увеличении содержания обоих модифицирующих добавок (рис. 3, в).

Самые низкие значения твердости (289...324 НВ) отмечены в образцах плавок 7 (6 % Al, SiC) и 5 (2 % Al, SiC, TiCN). Это связано с наличием значительного количества графита в структуре и уменьшением количества карбидной составляющей, неравномерным распределением структурных составляющих и крупнозернистой структурой. И хотя микротвердость структурных составляющих в чугунах плавки 5 достаточно высока, влияние выше перечисленных факторов является преобладающим.

В группе сплавов с 2 % алюминия небольшая твердость (365 НВ) была у отливок модифицированных SiC, в их структуре выявлен пластинчатый графит с неравномерным распределением, неоднородная матрица (сочетание участков белого и серого чугуна), меньшая микротвердость цементита.

На твердость слитков из чугунов с 6 % алюминия влияние оказывают следующие факторы: количество карбидной составляющей, равномерность структуры, микротвердость ее отдельных составляющих. Высокая твердость образцов плавки 8 (6 % Al, SiC, TiCN) в основном обусловлена значительным количеством карбидной составляющей и равномерностью структуры.

Желательные значения твердости также имеют образцы плавок 1 (2 % Al) и 6 (2 % Al, TiCN). В их структуре есть небольшое количество графита шаровидной формы и с равномерным распределением, высокая микротвердость структурных составляющих. В чугунах плавки твердость также повышается за счет образования пластинчатого ледебурита и измельчения структуры.

В результате проведенных исследований твердости выделены три группы чугунов, легированные 2 % алюминия, легированные 2 % алюминия и модифицированные TiCN, а также легированные 6 % алюминия и модифицированные SiC, TiCN, как отвечающие желательным значениям.

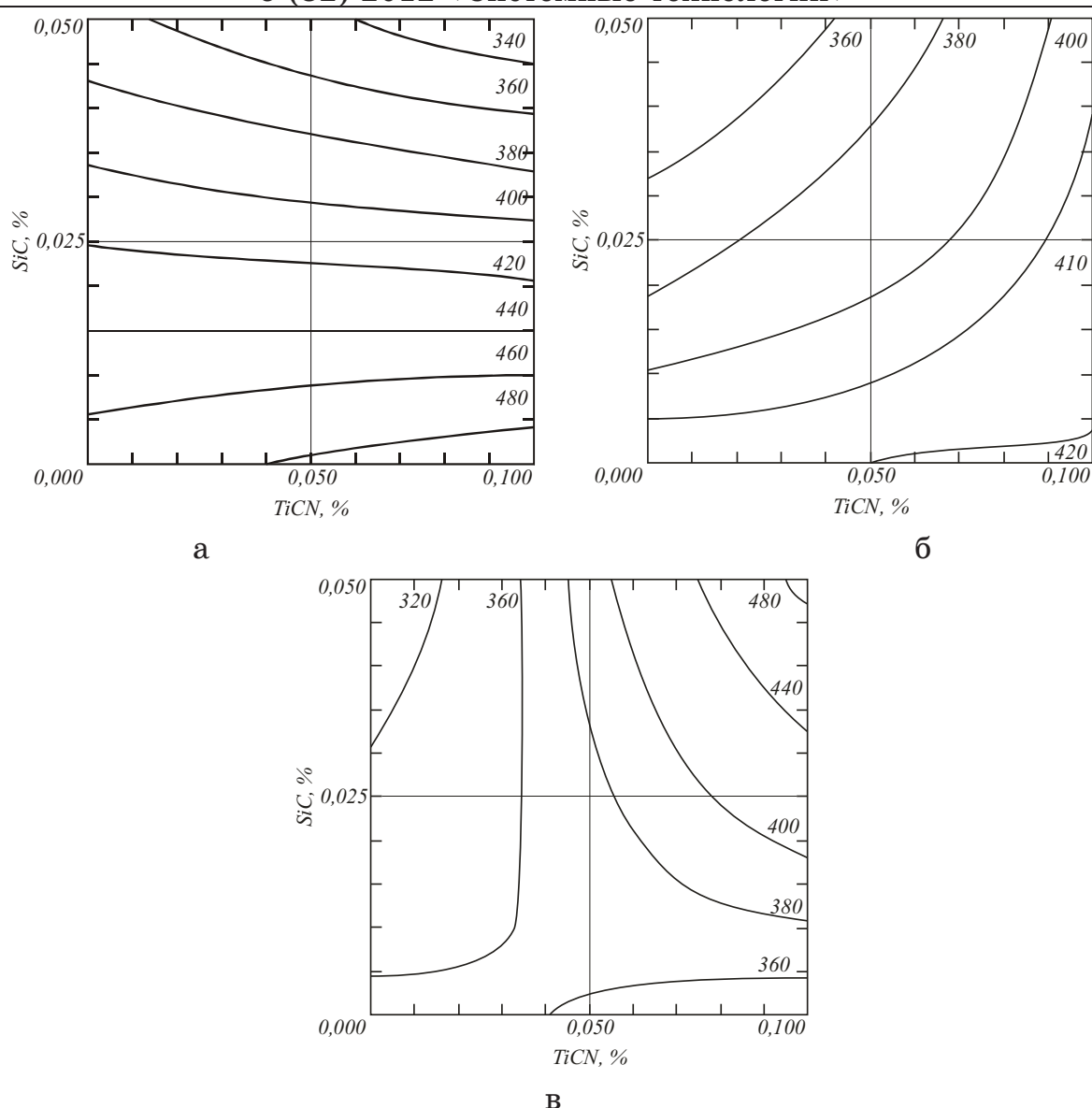


Рисунок 3 – Двумерное сечение поверхности отклика зависимости:
 а - $HV = f(TiCN, SiC)$ при 2 % Al; б - $HV = f(TiCN, SiC)$ при 4 % Al;
 в - $HV = f(TiCN, SiC)$ при 6 % Al

Аналогичный анализ проведен и для остального комплекса необходимых свойств (см. табл. 2) и установлен отвечающий им сплав: содержащий 6,0 % алюминия и модифицированный комплексом $Se + TiCN + SiC$.

Отливки из опытного чугуна прошли испытания в промышленных условиях частного научно-производственного предприятия «КАРИОН-СЕРВИС» (г. Днепропетровск), где были использованы в качестве литых коробов для спекания керамических стержней в электропечах камерного типа. По результатам оценки работы коробов

и опок в промышленных условиях установлено, что комплексное легирование и модифицирование обеспечивает повышение физико-механических и специальных свойств чугуна на 20 – 25 % по сравнению с ЧХ1, ЧХ2, ЧХ3;

Выводы. Благодаря применению планирования эксперимента получена максимальная информация об объекте исследования (многокомпонентном сплаве) при минимальном количестве опытов. При этом на объект оказывали действие многие факторы – химический состав сплава, его легирование и модифицирование. В результате проведенных исследований установлено, что комплексу необходимых свойств отвечали сплавы, содержащие 6,0 % алюминия и модифицированные комплексом $\text{Ce} + \text{TiCN} + \text{SiC}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванова Л. Х. Теоретические основы и практические методы получения литых прокатных валков из комплексномодифицированных чугунов: дис. ... доктора техн. наук: 05.16.04/Иванова Людмила Харитоновна – Д., 2007.–499 с.
2. Соценко О. В. Научные основы структурообразования, разработка и внедрение технологии крупногабаритных каландровых валов для бумагоделательных машин: автореф. дис. на соискан. учен. степени докт. техн. наук : спец. 05.16.01 «Металловедение и термическая обработка металлов», 05.16.04 «Литейное производство» / О. В. Соценко. – Д., 1995. – 46 с.
3. Калинин В. Т. Научные основы прогрессивных технологий модифицирования и легирования чугунов для отливок металлургического оборудования: дис. ... доктора техн. наук: 05.16.04 / Калинин Василий Тимофеевич. – Д., 2005. –399 с.
4. Матвеева М. О. Белые износостойкие чугуны легированные марганцем, титаном и азотом / М. О. Матвеева // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2003. – № 1. – С. 29–32.
5. Матвеева М.О. Влияние хрома и титана на структуру и свойства белых чугунов / М. О. Матвеева // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2010. – № 1. – С. 54–57.
6. Чугун / [Шерман А. Д., Жуков А. А., Абдуллаев Е. В. и др.]; под ред. А. Д. Шермана и А. А. Жукова. -1-е изд. - М. : Металлургия, 1991. - 576 с.
7. Бобро Ю. Г. Легированные чугуны / Ю. Г. Бобро.- М. : Металлургия, 1976. - 288 с.