

М.О. Матвеева Б.В. Климович, В.В. Климович, Е.А. Дворникова
**СИМПЛЕКСНЫЙ МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ ПРИ ЛИТЬЕ
ЧУГУНОВ С ЗАДАННЫМ КОМПЛЕКСОМ СВОЙСТВ**

Аннотация. В настоящих исследованиях подтверждена целесообразность применения математического планирования эксперимента для повышения экономической и научной эффективности исследований по определению влияния отдельных легирующих элементов и их сочетаний на комплекс механических и эксплуатационных свойств отливок. Для изучения комплексного влияния Cr и Ti на структуру и свойства чугунов применено симплексное планирование эксперимента, в результате установлено поле оптимальных содержаний легирующего комплекса для отливок, сочетающих заданные твердость, плотность, коррозионную и жаростойкость. Разработанные составы сплавов рекомендуется использовать для деталей пресс-форм стекловырабатывающих машин, элементов плунжерных пар машин для литья под давлением, деталей коксохимического оборудования и др.

Возрастающие требования к повышению работоспособности машин, снижению их удельной металлоемкости ставят перед литейным производством задачи по совершенствованию техники и технологии производства литейных сплавов.

Анализ состояния вопроса. Отдельные химические элементы изменяют свойства железо-углеродистых сплавов уже при чрезвычайно низких концентрациях, оказывая иногда определяющую роль в формировании механических и эксплуатационных свойств отливок. К таким элементам относится титан, который практически всегда находится в чугуне и даже в небольших количествах оказывает влияние на структуру и свойства отливок [1, 2, 3]. Одним из наиболее распространенных легирующих элементов для чугунов является хром [1], он определяет микроструктуру [4], физические и эксплуатационные характеристики отливок [5, 6, 7]. Поэтому важно установить его оптимальное количество для получения определенных функциональных свойств.

Целесообразно для повышения экономической и научной эффективности исследований по определению влияния отдельных легирующих элементов и их разных сочетаний на комплекс характеристик изделий применять математическое планирование эксперимента.

Цель исследований. Применение математического планирования эксперимента для оптимизации комплексного влияния легирования хромом и титаном на чугун для отливок, сочетающих определенный уровень механических и эксплуатационных свойств.

Применительно к экспериментальному чугуну были поставлены и решены следующие задачи: исследована микротвердость структурных составляющих, твердость, плотность, жаро- и коррозионная стойкость отливок; определено оптимальное содержание хрома и титана в исследуемом чугуне.

Для изучения комплексного влияния Cr и Ti на структуру и свойства чугунов применено симплексное планирование эксперимента, которое объединяет в себе процедуры изучения объекта и поиска оптимума. Для этого использовали специальный план эксперимента в виде симплекса (план Шеффе). Симплекс в k -мерном факторном пространстве представляет собой k -мерную замкнутую геометрическую фигуру, образованную $k + 1$ вершинами, которые соединены между собой прямыми линиями. При этом координаты вершин симплекса являются значениями факторов в отдельных опытах. В двухфакторном пространстве – это симплекс треугольник (рис. 1).

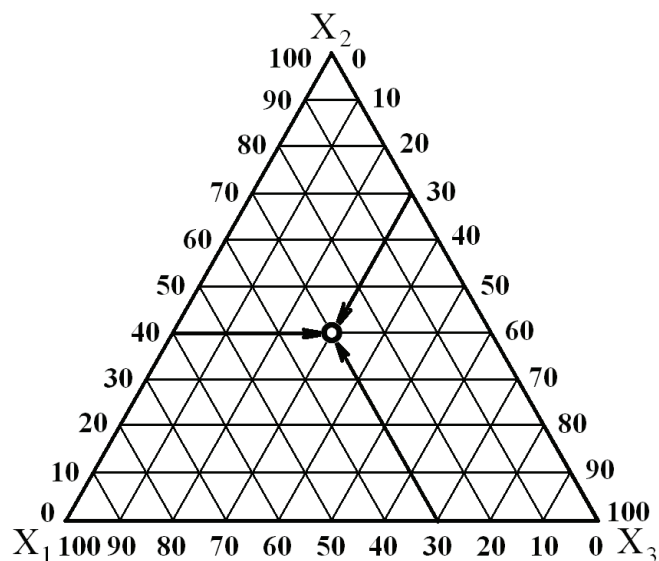


Рисунок 1 – Ключ симплексной решетки

Коды исследуемых сплавов в соответствии со схемой (рис. 1), их элементарный состав и коды функций откликов приведены в табл. 1, 2, 3.

Таблица 1

Кодовое обозначение опытных сплавов

Номер сплава	Условное обозначение	Состав					
		в натуральном масштабе (% , по массе)			в кодированном масштабе		
		Cr	Ti	Fe	X ₁	X ₂	X ₃
1	X ₁	100	-	-	1	0	0
2	X ₂	-	100	-	0	1	0
3	X ₃	-	-	100	0	0	1
4	X ₁₂	50	50	-	1/2	1/2	0
5	X ₁₃	50	-	50	1/2	0	1/2
6	X ₂₃	-	50	50	0	1/2	1/2
7	X ₁₂₃	33,333	33,333	33,333	1/3	1/3	1/3

Таблица 2

Кодовое обозначение опытных сплавов

Номер сплава	Условное обозначение	Содержание элемента в сплаве, % (по массе)		
		Cr	Ti	Fe
1	X ₁	1,17	0,01	92,805
2	X ₂	5,63	0,01	88,134
3	X ₃	5,03	0,2	88,723
4	X ₁₂	3,4	0,01	90,756
5	X ₁₃	3,1	0,105	90,66
6	X ₂₃	5,33	0,105	88,58
7	X ₁₂₃	3,94	0,07	89,996

По плану Шеффе возможно построение модели следующего вида:

$$Y = \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \beta_3 \cdot x_3 + \beta_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + \beta_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + \beta_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + \beta_{123} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \quad (1)$$

где Y – свойство материала;

β – коэффициент регрессии;

x – количество материала в сплаве.

Таблица 3

Коды функций отклика

Функция отклика	Код
Микротвердость перлита, МПа (H ₅₀ П)	Y ₄
Микротвердость цементита, МПа (H ₅₀ Ц)	Y ₅
Твердость, HRC	Y ₆
Плотность, кг/м ³ (ρ)	Y ₇
Максимальная плотность тока в активной области, А/м ² (i _{max})	Y ₈
Жаростойкость, г/м ² час (G)	Y ₉

Коэффициенты регрессии определяли по формулам:

$$\beta_1 = \xi_1, \quad (2)$$

$$\beta_{ij} = 4 \cdot \xi_{ij} - 2 \cdot \xi_i - 2 \cdot \xi_j, \quad (3)$$

$$\beta_{123} = 27 \cdot \xi_{123} - 12 \cdot (\xi_{12} + \xi_{13} + \xi_{23}) + 3 \cdot (\xi_1 + \xi_2 + \xi_3), \quad (4)$$

где ξ_i , ξ_j , ξ_{123} – результаты опытов в точках симплексных решёток.

По результатам экспериментальных исследований рассчитаны коэффициенты регрессии и реализованы симплексные решетки, где поля нежелательных значений параметров – затемнены. Выделение на симплексных решётках полей с недопустимым уровнем свойств, с последующим наложением полученных изображений на одну решётку, позволило определить поле оптимальных содержаний элементов в разрабатываемом составе чугуна.

Изменение микротвердости цементита и перлита показано на рис. 2, а, б соответственно. С увеличением содержания хрома и титана микротвердость обоих структурных составляющих увеличивалась. В исследуемом легирующем комплексе хром в основном находится в цементите и упрочняет его, в то время как соединения титана распределяются в перлите и способствуют повышению его твердости. Достоверность полученных данных подтверждают результаты измерения твердости (рис. 2, в). Твердость слитков экспериментальных чугунов возрастает с увеличением количества легирующего комплекса Cr + Ti.

Зависимость плотности экспериментальных чугунов от количества легирующего комплекса Cr + Ti представлена на рис. 3, а. Расположение изолиний показывает, что с увеличением количества хрома и титана плотность экспериментальных отливок увеличивалась.

Коррозионную стойкость сплавов исследовали по их электрохимическому поведению потенциодинамическим методом в среде 5 %-ного раствора серной кислоты. Анализ полученных результатов показал, что с увеличением количества титана токи в активной области растворения уменьшаются. Так, при 0,01 % титана и 5,63 % хрома ток составляет 528 А/м², а при 0,20 % титана и 5,03 % хрома – 376 А/м². В сплавах с большим содержанием титана ток в активной области уменьшается, соответственно они будут иметь лучшую коррозионную стойкость. Снижение тока в активной области с увеличением

содержания хрома и титана подтверждают результаты, показанные на рис. 3, б.

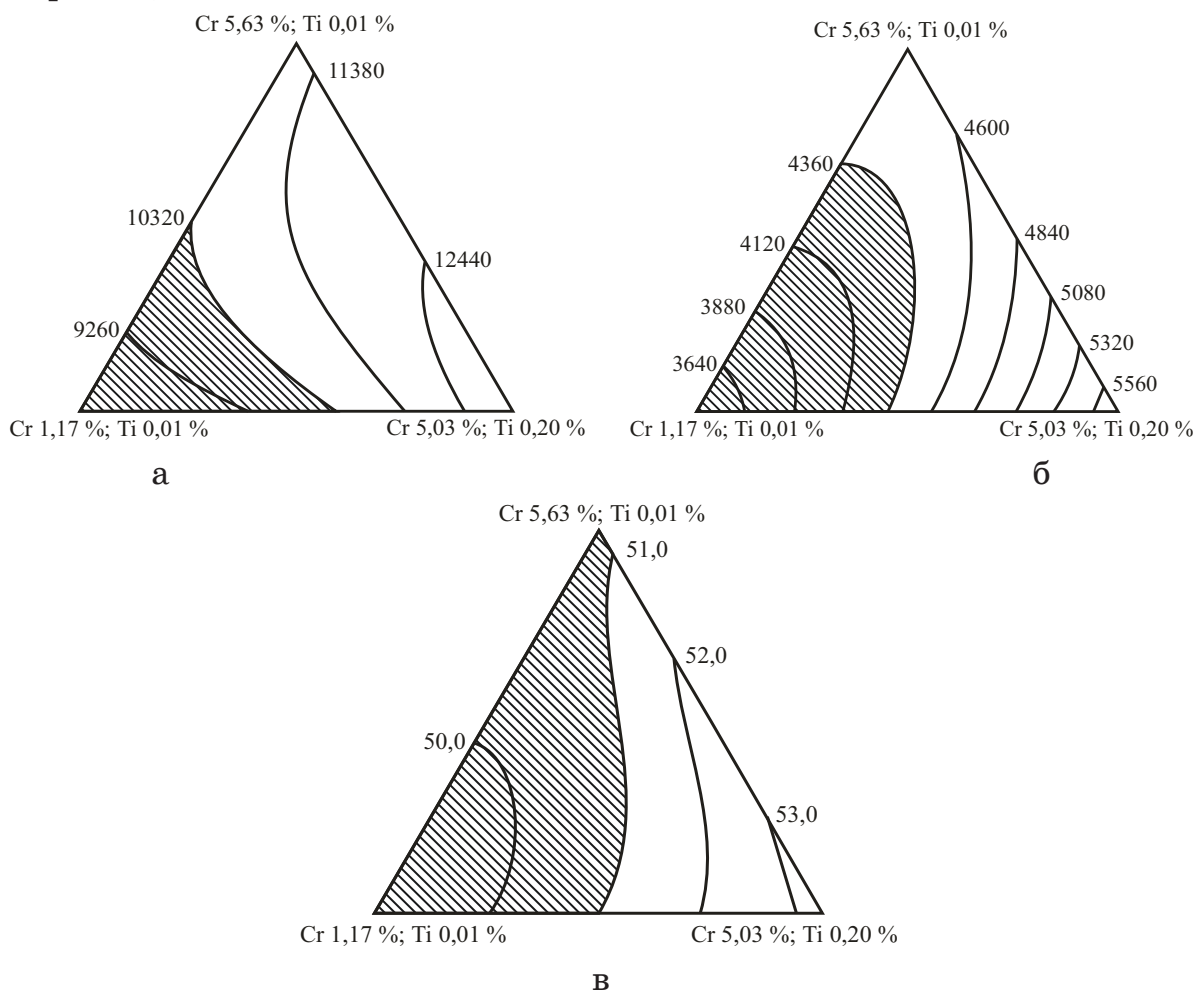


Рисунок 2 – Микротвердость (МПа) цементита (а), перлита (б), твердость (HRC) отливок (в)

Установлено, что на процессы коррозии в опытных чугунах влияют количество цементита, размеры эвтектических колоний и плотность сплава. Получено еще одно подтверждение того, что наличие титана на уровне примеси отрицательно сказывается на свойствах чугуна.

По результатам проведенных исследований наиболее устойчивыми к коррозии были сплавы с большим содержанием титана, о чем свидетельствуют более низкие токи в активной области. При этом увеличение количества хрома (в исследуемых пределах) ухудшает уровень стойкости не столь выражено.

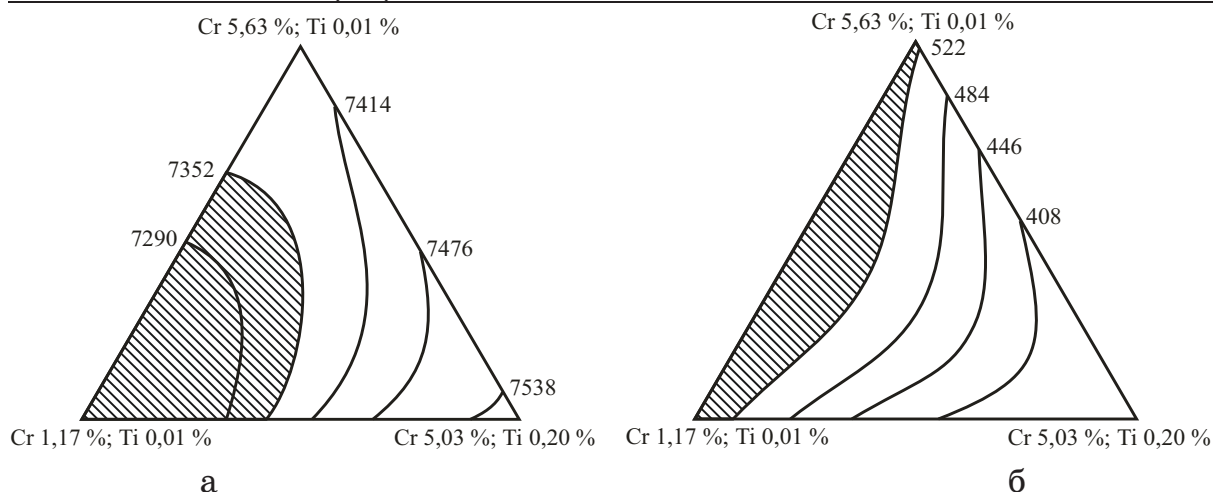


Рисунок 3 – Плотность экспериментальных чугунов, $\text{кг}/\text{м}^3$ (а); максимальная плотность анодного тока растворения чугуна в активной области, $\text{А}/\text{м}^2$ (б)

Согласно ГОСТ достаточной считается жаростойкость при приросте массы не более $0,5 \text{ г}/(\text{м}^2 \text{ час})$ при определенной температуре испытаний в течение 150 часов. При температуре испытаний $500 \text{ }^\circ\text{C}$ все экспериментальные сплавы имели достаточную жаростойкость $0,10 - 0,32 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{час})$. С повышением температуры до $600 \text{ }^\circ\text{C}$ жаростойкость отливок с содержанием $0,01 \text{ \%}$ титана становилась неудовлетворительной $0,59 - 0,68 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{час})$. Удовлетворительную жаростойкость при $700 \text{ }^\circ\text{C}$ $0,45 - 0,50 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{час})$ имели отливки с возрастающим содержанием хрома и титана. Лучшим был сплав с $5,03 \text{ \% Cr}$ и $0,20 \text{ \% Ti}$, он же сохранил достаточную жаростойкость и при температуре испытаний $800 \text{ }^\circ\text{C}$. При температуре $900 \text{ }^\circ\text{C}$ все сплавы потеряли жаростойкость. Результаты анализа жаростойкости при всех температурах испытаний показаны на рис. 4.

Жаростойкость экспериментальных чугунов тем лучше, чем выше в них содержание хрома и титана. С увеличением количества титана свыше $0,1 \text{ \%}$ он перестает отрицательно влиять на этот показатель.

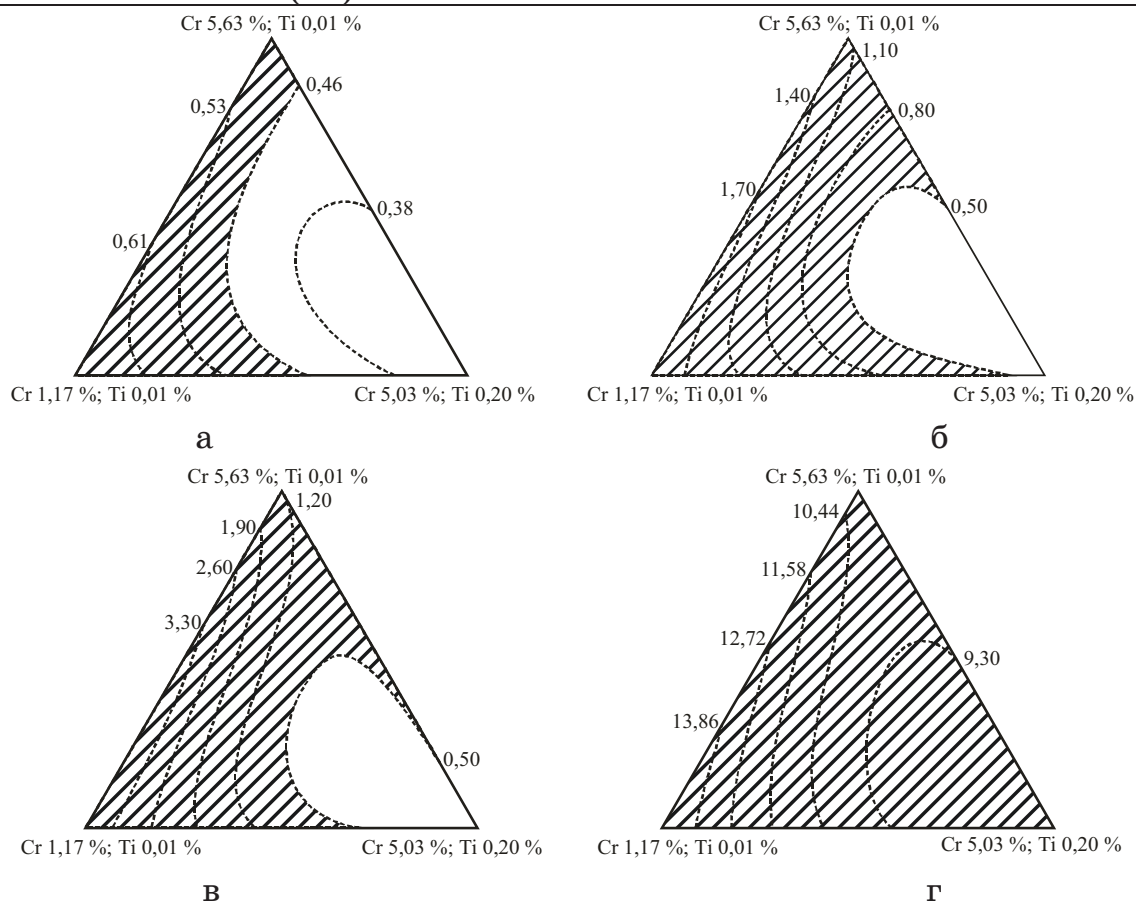


Рисунок 4 - Жаростойкость экспериментальных отливок при температурах 600 °С (а), 700 °С (б), 800 °С (в), 900 °С (г)

Результат совмещения симплексных решеток представлен на рис. 5, где поле оптимальных содержаний осталось незатемненным. Исходя из того, что с увеличением температуры испытаний на жаростойкость оптимальная область содержаний исследуемых элементов сужается и стремится к точке X_3 , рационально принять следующее содержание хрома и титана (% , по массе): 3,20 – 5,03 Cr; 0,014 – 0,20 Ti.

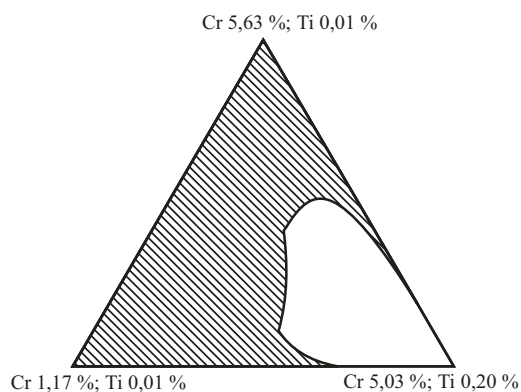


Рисунок 5 - Совмещенная симплексная решетка

Выводы

В результате симплексной оптимизации по плану Шеффе установлено поле оптимальных содержаний хрома 3,20...5,03 % и титана 0,014...0,20 % в легирующем комплексе для отливок, сочетающих твердость не менее 51,0 HRC, микротвердость цементита и перлита выше 10320 МПа и 4360 МПа соответственно, плотность отливок не ниже 7352 кг/м³, максимальную плотность тока в активной области при коррозионных испытаниях в серной кислоте менее 522 А/м², жаростойкость при приросте массы не более 0,5 г/(м² час) и температурах испытаний 500 – 800 °С в течение 150 часов.

Разработанные составы сплавов рекомендуется использовать для деталей пресс-форм стекловырабатывающих машин, элементов плунжерных пар машин для литья под давлением, деталей коксохимического оборудования и др. Так, изготовление поршней плунжерных пар машин литья под давлением вместо серого чугуна из экспериментального повысит срок их службы в 2,0 – 4,0 раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Матвеева М.О. Влияние титана на формирование структуры чугуна/ М.О.Матвеева, О.М.Шаповалова // Металознавство та термічна обробка металів. – 2008. - № 1. – С. 65-75.
3. Матвеева М.О. Исследование коррозионной стойкости чугунов экономнолегированных титаном/ М.О.Матвеева, Е.Э.Чигиринец, А.А.Макарова // Вісник Донбаської Державної Машинобудівної Академії. – 2009. - № 1. – С.203-207.
4. Матвеева М. О. Влияние содержания хрома на морфологию структуры перлита / М. О. Матвеева, О. М. Шаповалова // Теория и практика металлургии. – 2005. – № 3. – С. 52–58.
5. Матвеева М. О. Влияние хрома на плотность белого и половинчатого чугуна / М. О. Матвеева, О. М. Шаповалова // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2006. – № 5. – С. 37–41.
6. Матвеева М. О. Разработка чугунов с повышенными эксплуатационными свойствами / М. О. Матвеева // Литейное производство. – 2007. – № 9. – С. 2–5.
7. Матвеева М. О. Исследование коррозионной стойкости чугунов экономнолегированных хромом / М. О. Матвеева, Е. Э. Чигиринец // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2007. – № 5. – С. 52.