

УДК 621.74

Іванова Л. Х., Колотило Є. В.

**КОМПЛЕКСНИЙ МОДИФІКАТОР ДЛЯ ВАЛКІВ ІЗ ЧАВУНУ
З ВЕРМИКУЛЯРНИМ ГРАФІТОМ**

Присадка модифікуючих добавок у виді комплексних модифікаторів (КМ) у розплав чавуну застосовується здавна. Прийнято вважати, що вперше технологія одержання модифікованого чавуну була розроблена понад вісімдесяти років тому Міханом, котрий застосував як модифікатор силікокальцій [1]. Теперішнього часу відомо декілька тисяч складів модифікаторів, у котрі входять графітізуючі, стабілізуючі, сфероїдизуючі та інші компоненти. Найбільшу кількість модифікаторів створено на основі феросиліцію, для покращення використовували рідкісноземельні та інші хімічні елементи.

Точних даних про ефективність модифікаторів немає, не вважаючи на те, що в науково-технічній літературі наведені результати багаточислених експериментальних досліджень. Це пояснюється, очевидно, тим, що ефективність тих або інших модифікаторів залежить від різноманітних умов виробництва виливків. Тому вибір модифікаторів проводять експериментальним шляхом.

Вальцеливарне виробництво як складний та охоплюючий використання білих, половинчастих і сірих чавунів тип виробництва має потребу в експериментальних дослідженнях з відпрацювання та оптимізації складів КМ для одержання високоякісних чавунів і у робочому шарі, і у серцевині прокатних валків. Для цього провели дослідження для визначення оптимального, тобто забезпечуючого найліпші властивості у чавунах, складу КМ з легувальними елементами.

Застосування того чи іншого конкретного складу КМ для лиття прокатних валків визначається багатьма факторами. У загальному виді якість чавунів (W) оцінювали 3 параметрами:

$$W = a \frac{[BG]}{[E] \cdot [\Phi]},$$

де a – коефіцієнт;

BG – частка графітних включень вермикулярної форми в загальній кількості графіту, %;

E – модуль пружності;

Φ – кількість фериту в мікроструктурі чавуну, %.

Вибір оптимального складу КМ здійснювали з використанням методу математичного планування експерименту. Як незалежні змінні були обрані – вміст в лігатурі рідкісноземельних металів (РЗМ), кремнію, титану та міді. Для реалізації задачі, що пов'язує обрані параметри чавуну з вмістом обраних хімічних елементів у КМ, використовували планування експерименту за типом 4×4 латинського квадрату [2], досліди у комірках якого ставили у випадковому порядку. Адекватність планування розраховували за схемою [2]. Гіпотезу про незначимість усіх взаємодій перевіряли за критерієм Фішера.

Обробку експериментальних даних, що були одержані в експерименті, та визначення оптимального складу КМ проводили за допомогою комплексного показника якості – узагальненої функції бажаності D [3]:

$$D = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n d_i},$$

де d_i – бажаність i -го параметру оптимізації, що визначається за рівнянням.

$$d_i = \exp[-\exp(-y_i)],$$

де y_i – i -тий параметр оптимізації.

Для побудови функції бажаності використовували значення обраних параметрів чавунів робочого шару валків на основі аналізу даних [4–6].

Метою даної роботи є розробка для вальцеливарного виробництва оптимального складу комплексних модифікаторів, введення яких в розплави призводить до поліпшення структури і властивостей матеріалу прокатних валків.

Особливості модифікуючого впливу КМ проводили в лабораторних умовах на технічних чавунах (табл.1). Чавуни плавлять у силітовій печі. Як модифікатори використовували КМ, що були одержані сплавленням лігатур з РЗМ на залізкокремнієвій основі з індивідуальними РЗМ, феротитаном, міддю та карбонільним залізом. Значення факторів при проведенні експериментів наведені у табл. 2, а середні величини параметрів дослідних чавунів в вихідному немодифікованому стані та після модифікування лігатурами (16 типів) наведені в табл. 3.

Таблиця 1

Характеристика базових чавунів

Тип чавуну	Вміст хімічних елементів, мас. %								Швидкість кристалізації, град/с
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Fe	
t ₁	3,99	0,76	0,75	0,06	0,03	–	–	решта	5,5...1,3
t ₂	3,54	0,80	0,74	0,07	0,02	–	–	«	5,5...1,3
t ₃	3,74	0,80	0,38	0,10	0,03	0,03	–	«	5,5...1,3
t ₄	3,85	0,72	0,62	0,07	0,02	–	–	«	5,5...1,3

Таблиця 2

Значення факторів при плануванні

Фактори		Рівні факторів	
A	Вміст РЗМ у складі КМ, %	a ₁ – 10	a ₂ – 20
B	Вміст титану у складі КМ, %	b ₁ – 10	b ₂ – 20
C	Вміст кремнію у складі КМ, %	c ₁ – 25	c ₂ – 15
D	Вміст міді у складі КМ, %	d ₁ – 35	d ₂ – 20
T	Тип чавуну	t ₁ , t ₂ , t ₃ , t ₄	

В лабораторних умовах метал після розплавлення і доводки за хімічним складом перегрівали до температури $1723 \pm 10\text{K}$, після чого піч відключали та при досягненні необхідної температури чавун модифікували в печі методом примусового занурення модифікатора. Після модифікування метал випускали та заливали форми діаметром 15...25 і висотою 130...150 мм. З одержаних виливків вирізували зразки для хімічного та металографічного аналізів та визначення модуля пружності. 2.6. Експрес-аналіз хімічного складу чавуну в процесі дослідних плавок здійснювали на квантометрі «Полівак Е-600». Металографічний аналіз проводили на оптичному мікроскопі Neophot 21. Кількість структурних складових визначали точечним методом Глаголева у 20...195 полях зору при збільшенні 400, що забезпечувало абсолютну похибку $\leq 1\%$ і достовірність 0,9544. Модуль пружності визначали

ультразвуковим методом на приладі УЗІС-ЛЕТІ на зразках з плоско паралельними гранями та чистотою поверхні Ra 0,63 за методикою [7]. Величину модуля пружності розраховували як середню з п'яти випробувань.

Таблиця 3

Узагальнені результати експерименту

Номер досліджу	Фактори				Значення параметрів оптимізації			Показник D
	A	B	C	D	y ₁	y ₂	y ₃	
					ВГ, %	Φ, %	$\bar{E} \cdot 10^4$, МПа	
0	-	-	-	-	0	12,0	0,182	0
1	a ₁	b ₁	c ₁	d ₁	90	6,5	0,177	0,47
2	a ₁	b ₂	c ₁	d ₁	100	6,0	0,175	0,57
3	a ₂	b ₁	c ₁	d ₁	50	4,0	0,178	0,45
4	a ₂	b ₂	c ₁	d ₁	65	4,0	0,177	0,53
5	a ₁	b ₁	c ₁	d ₂	88	0	0,178	0,72
6	a ₁	b ₂	c ₁	d ₂	100	0	0,172	0,90
7	a ₂	b ₁	c ₁	d ₂	55	0	0,179	0,57
8	a ₂	b ₂	c ₁	d ₂	70	0	0,178	0,67
9	a ₁	b ₁	c ₂	d ₁	85	5,5	0,176	0,52
10	a ₁	b ₂	c ₂	d ₁	97	5,0	0,176	0,59
11	a ₂	b ₁	c ₂	d ₁	45	3,0	0,179	0,44
12	a ₂	b ₂	c ₂	d ₁	55	2,5	0,177	0,53
13	a ₁	b ₁	c ₂	d ₂	90	0	0,178	0,72
14	a ₁	b ₂	c ₂	d ₂	100	0	0,171	0,92
15	a ₂	b ₁	c ₂	d ₂	35	0	0,180	0,45
16	a ₂	b ₂	c ₂	d ₂	50	0	0,179	0,54

Результати сумарного дисперсійного аналізу для узагальненої функції бажаності показали, що експериментальні дані підтвердили гіпотезу про незначимість ефектів взаємодії, тобто у цих умовах адекватність планування за латинським квадратом підтверджується: головні ефекти не змішані із взаємодіями.

В результаті проведеного експерименту встановлено, що до оптимальних параметрів КМ слід віднести вміст РЗМ – 15 і кремнію 15, титану 20 і міді 25%, при котрих комплексний показник якості чавуну D мав максимальне значення 0,92, що у 2,4...2,5 рази перевищувало показник D вихідних чавунів.

У виробничих умовах були проведені порівнювальні дослідження структури та властивості дослідних валків, що були відлиті з застосуванням КМ оптимального складу (хімічний склад чавуну робочого шару валків, %: С 3,11; Si 0,96; Mn 0,51; P 0,16; S 0,01; РЗМ 0,185; Ti Cu), та серійного виробництва, що були відлиті з застосуванням магнію (хімічний склад чавуну робочого шару валків, %: С 3,00; Si 1,03; Mn 0,43; P 0,23; S 0,01; Mg 0,04).

Дослідження структури валків серійного виробництва і дослідних проводили на зразках від бочок і шийок, які відрізали при їх механічному обробленні, а також на дисках, які відбирали при розрізанні валків-представників дослідно-промислових партій. В результаті порівнювального дослідження структури валків-представників серійного виробництва і дослідно-промислової партії показано, що структура робочого шару валків являла собою

конгломерат карбиду і продуктів розпаду аустеніту. При близькому хімічному складі порівнювальних валків у структурі робочого шару валків-представників дослідно-промислової партії графіт був відсутній, тоді як у валку серійного виробництва кількість його складала від 0,5 на глибині 10 мм до 2,5% – на глибині 20 мм. У валках серійного виробництва умовний розмір карбідів складав для глибин 10 і 20 мм 8,7 і 9,4 мкм, відповідно, тоді як при модифікуванні КМ (на тих самих глибинах) умовний розмір був 7,1 і 7,9 мкм (температури заливання порівнювальних валків були однаковими).

Будова перліту в робочому шарі валків дослідно-промислової партії характеризувалася балами ПД1,0 і ПД0,5, а у валках серійного виробництва – ПД1,0Р і ПД1,4Р. З видаленням від поверхні дисперсність перліту збільшувалася, причому у валках-представниках дослідно-промислових партій дисперсність перліту залишалася на один бал вищою. Анормальність у будові перліту, яку оцінювали за шкалою НМетАУ [8], на глибинах 10 і 20 мм, відповідно, була у валках серійного виробництва Па4 і Па3, а у дослідних валках – Па3 і Па2. З видаленням від поверхні анормальність знижувалася до Па1.

Випробовування механічних властивостей було проведено на зразках, вирізаних з дисків валків-представників дослідно-промислової партії та серійного виробництва. Механічні властивості робочого шару валків-представників дослідно-промислової партії були вищими, ніж у валків близького хімічного складу, відлитих з магнієвого чавуну. Наприклад, на глибині 10 мм границі міцності $S_{\sigma}^{виц}$ і S_{σ}^P дослідних валків були на 15...25 % вищими, ніж у валків серійного виробництва. З видаленням від поверхні границі міцності $S_{\sigma}^{виц}$ і S_{σ}^P чавуну дослідних валків залишалися вищими, ніж у валків серійного виробництва. І тільки на відстанях 100...120 мм від поверхні бочки в глибину, переважно у верхніх частинах бочок, міцність чавуну дослідних валків була на 10...15 % нижчою, ніж чавуну валків серійного виробництва.

ВИСНОВКИ

Для умов вальцеливарного виробництва за допомогою методу математичного планування експерименту та розробленого комплексного показника якості валкових чавунів оптимізований склад КМ на основі РЗМ. В результаті проведеного експерименту встановлено, що до оптимальних параметрів КМ слід віднести вміст РЗМ – 15 і кремнію 15, титану 20 і міді 25 %, при котрих комплексний показник якості чавуну D мав максимальне значення 0,92, що у 2,4...2,5 рази перевищувало показник D вихідних чавунів.

В результаті проведених досліджень в промислових умовах було підтверджено, що лиття прокатних валків з використанням для модифікування розплаву КМ призводить до поліпшення структури і властивостей матеріалу бочки прокатних валків.

ЛІТЕРАТУРА

1. Кобелев Н. И. Повышение качества чугунных отливок модифицированием / Н. И. Кобелев, И. А. Дибров, А. А. Романович. – Обзор. – М. : НИИМАШ, 1982. – 52 с.
2. Маркова М. В. Планирование эксперимента в условиях неоднородностей / М. В. Маркова, А. Н. Лисенков. – М. : Наука, 1973. – 219 с.
3. Harrington E. C. The Desirability Function / E. C. Harrington // *Industrial Quality Control*. – 1965. – Vol. 21. – № 10. – P. 494–498.
4. Кривошеев А. Е. Литые валки (теоретические и технологические основы производства) / А. Е. Кривошеев. – М. : Металлургиздат, 1957. – 360 с.
5. Белай Г. Е. Исследование влияния модифицирования на кристаллизацию чугуна, структуру и свойства листопрокатных валков : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Г. Е. Белай. – Д., 1967. – 21 с.
6. Колотило Е. В. Исследование и усовершенствование процессов производства листопрокатных валков из модифицированных чугунов : дис. ... канд. техн. наук / Е. В. Колотило. – Д., 1977. – 207 с.
7. Палестин С. М. Неразрушающий контроль прочности отливок из серого чугуна / С. М. Палестин, В. В. Мироненко // *Литейное производство*. – 1970. – № 5. – С. 39–41.
8. О влиянии анормальной структуры на свойства отливок из отбеленного магниевого чугуна / А. Е. Кривошеев и др. // *Известия вузов ЧМ*. – 1965. – № 7. – С. 169–174.