

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК.669.15

В. В. НЕТРЕБКО^{1*}, И. П. ВОЛЧОК²

^{1*}Каф. «Оборудование и технология сварочного производства», Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского, 64, Запорожье, Украина, 69063, тел. +38 (050) 486 27 40, эл. почта olgavvn@ukr.net, ORCID 0000-0003-3283-0116

²Каф. «Композиционные и порошковые материалы и технологии», Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского, 64, Запорожье, Украина, 69063, тел. +38 (061) 764 13 51, эл. почта tmzntu@gmail.com, ORCID 0000-0003-1580-0556

ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ЧУГУНА НА МЕЖФАЗНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ CR ПОСЛЕ ОТЖИГА ПРИ 690 °С

Цель. В научной работе необходимо установить влияние химического состава Fe–C–Cr–Mn–Ni чугуна на содержание хрома в металлической основе, карбидах, а также коэффициент межфазного распределения хрома после отжига при 690 °С (K_{Cr}^{690}). **Методика.** Исследовали чугуны, содержащие 1,09–3,91 % С; 11,43–25,57 % Cr; 0,6–5,4 % Mn; 0,19–3,01 % Ni и 0,8–1,2 % Si. Анализ распределения хрома производили с использованием методов математической статистики. Чугун выплавляли в индукционной печи емкостью 60 кг. **Результаты.** Применение методов активного планирования эксперимента 2^{4-1} позволило установить регрессионные зависимости концентрации хрома в основе и карбидах, а также коэффициент его межфазного распределения от содержания в чугуне С, Cr, Mn и Ni. Хром после отжига преимущественно концентрировался в карбидах. Содержание хрома в основе изменялась от 3,94 % при 3,23 % С, 5,4 % Mn, 11,43 % Cr и 3,01 % Ni – до 17,43 % при 1,09 % С, 0,60 % Mn, 25,57 % Cr и 1,32 % Ni. Минимальное значение коэффициента распределения K_{Cr}^{690} составило 2,1 в чугуне состава 1,09 % С, 0,6 % Mn, 11,43 % Cr и 0,19 % Ni, а максимальное – 9,4 при 3,91 % С, 0,6 % Mn, 11,43 % Cr и 3,01 % Ni. Распределение хрома определялось количеством и типом образующихся карбидов. В процессе отжига состав карбидов формировался в результате конкурирования карбидообразующих элементов и замещения атомов железа и марганца атомами хрома. **Научная новизна.** Авторами получены регрессионные зависимости содержания хрома в основе, карбидах и коэффициент его межфазного распределения от химического состава Fe–C–Cr–Mn–Ni чугуна после отжига при 690 °С. **Практическая значимость.** Полученные зависимости позволяют прогнозировать содержание хрома в металлической основе и могут быть использованы при разработке новых составов износостойких чугунов, а также при выборе режимов термической обработки.

Ключевые слова: чугун; хром; распределение; карбид; металлическая основа

Введение

Применение комплексного легирования высокохромистых чугунов позволяет формировать в них структуры, состоящие из заданного типа карбидов и соответствующей металлической основы, что существенно повышает эксплуатационные свойства литых деталей [16–18, 20]. В период кристаллизации и охлаждения в этих чугунах образуются неравновесные структуры, вследствие чего при термической обработке содержание хрома в карбидах повышается, а в металлической основе – снижается [3, 5,

10, 11]. Особенно сильные изменения химического состава металлической основы протекают в локальных объемах возле карбидов [19]. Гомогенизация металлической основы затруднена из-за сильного легирования твердого раствора.

Высокохромистые чугуны, легированные марганцем и никелем, подвергаются отжигу для снятия напряжений или придания им необходимых свойств. По ГОСТ 7769–82 [4] рекомендуется для снижения твердости и улучшения обрабатываемости резанием отливок из высокохромистых чугунов проводить отжиг (высокого отпуска) при

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

963–1023 °К (690–750 °С) с выдержкой в течение 6–12 часов и последующим охлаждением с печью.

Перераспределение элементов между структурными составляющими в процессе отжига связано с формированием карбидов различных типов. Хром и марганец являются элементами, которые распределяются между карбидной фазой и металлической основой [3, 11, 15]. В легированных хромом чугунах введение марганца сопровождается перераспределением атомов хрома между матрицей и карбидами. Увеличение Mn, способствуя повышению концентрации хрома в карбидах, приводит к снижению его содержания в локальных объемах матрицы вблизи карбидов [19]. При концентрации хрома менее 12 % снижается коррозионная стойкость изделий [5, 6, 8, 13]. Поэтому возникает необходимость обеспечения заданной концентрации хрома в металлической основе, особенно, вблизи межфазных (карбид-матрица) границ.

Никель, способствуя образованию аустенита, снижает растворимость углерода, особенно при высоких температурах [6]. Одновременно с этим, атомы никеля практически отсутствуют в карбидной фазе, в основном легируя твердые растворы хромсодержащих сплавов [3, 11].

В работах [2, 7, 9] исследовалось распределение элементов в высокохромистых чугунах и их перераспределение при термической обработке, однако не было уделено должного внимания процессам, протекающим в околокарбидных зонах.

В процессе кристаллизации чугунов и охлаждении отливок в литейной форме образуются карбиды неравновесного состава, что связано с непрерывным охлаждением и неполным выравниванием состава фаз. В процессе отжига происходит перераспределение элементов между фазами с образованием более равновесных структур, обладающих минимумом свободной энергии при температуре обработки. Повышение содержания хрома стабилизирует карбиды. Особенностью процесса формирования карбидов в твердом состоянии является переменная растворимость в них хрома и марганца, зависящая от температуры [3, 5, 12].

Одним из основных видов термической обработки литья является отжиг. Его применяют для улучшения обрабатываемости отливок, эксплуатируемых в условиях коррозионного воздействия среды. В процессе отжига содержание хрома в карбидах повышается, а в локальных зонах

возле карбидов снижается [3, 11], что негативно влияет на коррозионную стойкость изделий.

Анализ работ [2, 7, 9, 13–15] свидетельствует о необходимости проведения дополнительного изучения межфазного распределения хрома в высокохромистых чугунах.

Цель

Цель работы – анализ влияния химического состава высокохромистых чугунов на межфазное распределение хрома в течение отжига при 690 °С.

Методика

Серию высокохромистых чугунов состава: 1,09–3,91 % С; 11,43–25,57 % Cr; 0,6–5,4 % Mn; 0,19–3,01 % Ni и 0,8–1,2 % Si выплавляли в индукционной печи с основной футеровкой емкостью 60 кг. Температура разлива чугуна составляла 1390–1410 °С. Образцы исследовались в литом состоянии и после отжига в течение 9 часов при 690 °С. Структурный анализ проводили с использованием методик количественной металлографии [1]. Химический состав металлической основы и карбидов определяли в локальных точках на микроскопе РЕМ 106И.

Для построения математической модели распределения хрома в системе Fe–C–Cr–Mn–Ni использовали метод активного планирования эксперимента (табл. 1).

Таблица 1

Матрица планирования дробнофакторного эксперимента 2^{4-1}

Table 1

Matrix of fractional factorial experiment planning 2^{4-1}

Уровень варьирования факторов		Фактор, масс. %			
		C	Cr	Mn	Ni
Основной	0	2,5	18,5	3,0	1,6
Интервал	Δ	1,0	5,0	1,7	1,0
Звездное плечо	1,414 Δ	1,41	7,07	2,4	1,41
Верхние	+1	3,5	23,5	4,7	2,6
	+1,414	3,91	25,57	5,4	3,01
Нижние	-1	1,5	13,5	1,3	0,6
	-1,414	1,09	11,43	0,6	0,19

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

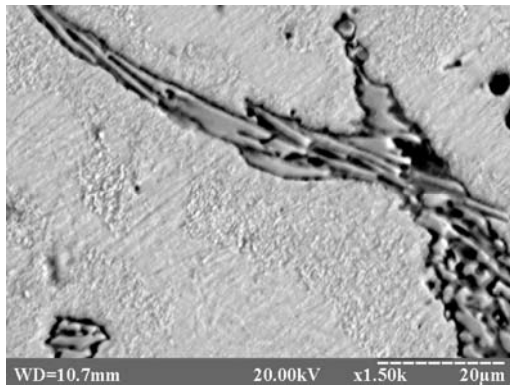
Коефіцієнт розподілення хрому (KP_{Cr}^{690}) определяли як відношення вмісту хрому в карбідах (Cr_k^{690}) до його вмісту в основі (Cr_o^{690}).

Результати

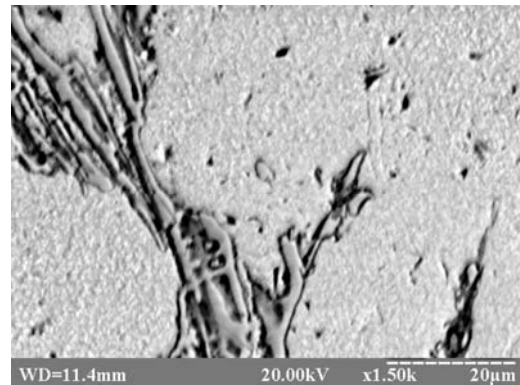
В процесі віджигу при $690\text{ }^\circ\text{C}$ $\alpha \leftrightarrow \gamma$ перетворень не спостерігалося. Металічна основа чугунів була ферритною, ферритоаустенитною і аустенитною (в залежності від його складу). В процесі витримки при віджигу спостерігалося перерозподілення хімічних елементів між карбідами і основою з утворенням рівновесних фаз.

Протікання дифузійних процесів забезпечувало зниження хімічної неоднорідно-

сті чугуна. Як показали дослідження, нікель практично повністю відсутній в карбідах. Одночасно з цим, пропорційно збільшенню вмісту вуглецю в чугуні, зростає концентрація нікеля в основі, що, в свою чергу, впливає на розподілення атомів марганцю і хрому. Більше того, формуються структурні стани металічної матриці впливають на стан межфазних меж. Так, в чугунах з ферритною основою спостерігалося значне растрівлювання меж розділу фаз (рис. 1). В протилежності цьому, в чугунах з аустенитною основою растрівлювання меж розділу фаз практично не виявлено (рис. 2).



a – a



b – b

Рис. 1. Структури чугунів з ферритною основою після травлення:

a – 1,5 % C; 18,5 % Cr; 1,3 % Mn і 1,6 % Ni; б – 2,5 % C; 23,5 % Cr; 1,3 % Mn і 1,6 % Ni

Fig. 1. Structures of cast iron with ferritic base after etching:

a – 1,5% C; 18,5% Cr; 1,3% Mn і 1,6% Ni; б – 2,5% C; 23,5% Cr; 1,3% Mn і 1,6% Ni

В результаті математичної обробки експериментальних даних отримані регресійні залежності вмісту хрому в

карбідах, основі, а також коефіцієнта його межфазного розподілення від вмісту в чугуні C, Cr, Mn і Ni:

$$Cr_k^{690} = 5,082C - 3,867Mn + 2,261Cr + 24,334Ni + 0,033Mn^2 - 2,696Ni^2 + 0,906CMn - 0,245CCr - 3,736C Ni + 0,106MnCr - 0,338MnNi - 0,314CrNi + 3,459 \quad (1)$$

$$Cr_o^{690} = -2,238C + 1,525Cr + 1,776Ni + 0,365C^2 - 0,022Cr^2 - 0,721Ni^2 - 0,041CCr + 0,116C Ni - 0,006MnCr - 5,224 \quad (2)$$

$$KP_{Cr}^{690} = 3,078C + 0,108Mn + 0,026Cr + 3,029Ni - 0,306C^2 - 0,011CCr - 0,156MnNi - 0,110CrNi + 0,196(Cr/C) - 3,509 \quad (3)$$

Дані рівняння є математички ймовірними (в відповідності з критеріями Стюдента, Фішера і Кохрена). Міні-

мальні і максимальні значення отриманих функцій і відповідні їм складі представлені в табл. 2.

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

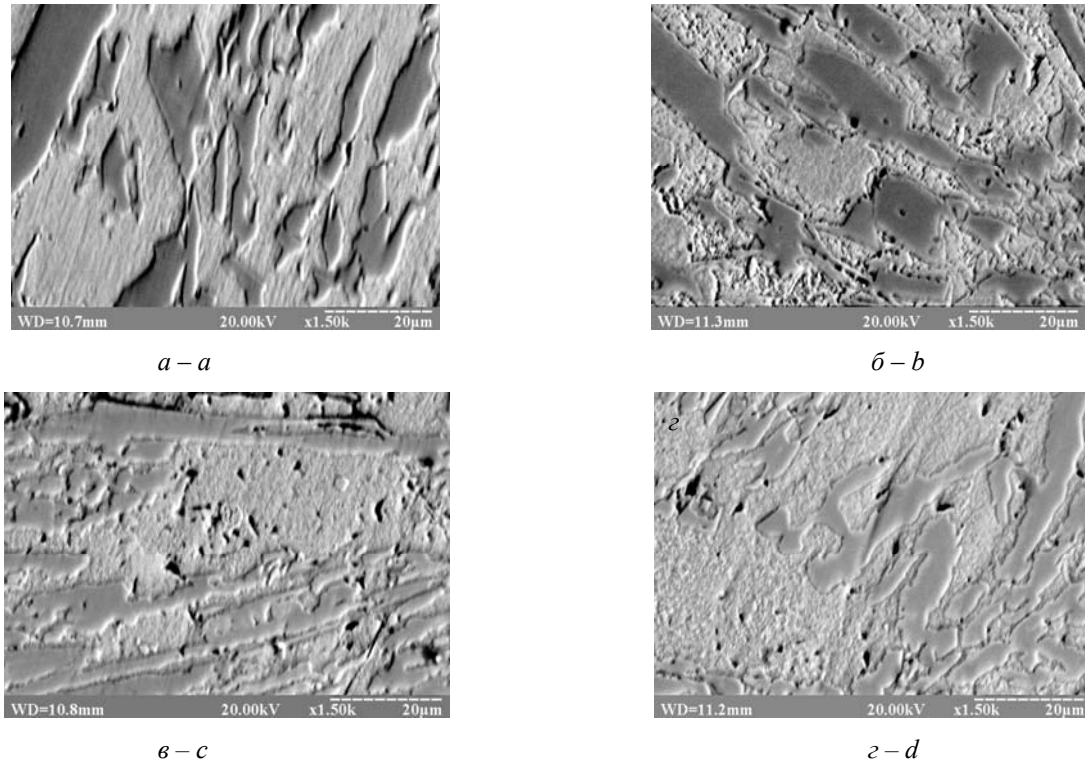


Рис. 2. Структури чугунов с аустенитной основой после травления:

a – 3,5 % C; 18,5 % Cr; 5,4 % Mn и 2,6 % Ni; *b* – 3,5 % C; 18,5 % Cr; 5,4 % Mn и 0,2 % Ni;
c – 2,5 % C; 18,5 % Cr; 1,3 % Mn и 3,0 % Ni; *c* – 2,5 % C; 11,5 % Cr; 1,3 % Mn и 1,6 % Ni

Fig. 2. Structures of cast iron with austenitic base after etching:

a – 3,5% C; 18,5% Cr; 5,4% Mn и 2,6% Ni; *b* – 3,5% C; 18,5% Cr; 5,4% Mn и 0,2% Ni;
c – 2,5% C; 18,5% Cr; 1,3% Mn и 3,0% Ni; *d* – 2,5% C; 11,5% Cr; 1,3% Mn и 1,6% Ni

Таблица 2

Минимальные и максимальные значения
 функций: $Cr_{кар}^{690}$, $Cr_{осн}^{690}$ и KP_{Cr}^{690}

Table 2

Minimum and maximum values of functions:
 $Cr_{кар}^{690}$, $Cr_{осн}^{690}$ and KP_{Cr}^{690}

Функция	Уровень	Величина	Состав, масс. %			
			C	Mn	Cr	Ni
$Cr_{к}^{690}$	min	26,5	1,09	5,4	11,43	0,19
	max	73,3	1,09	0,60	25,57	2,22
$Cr_{о}^{690}$	min	3,9	3,23	5,4	11,43	3,01
	max	17,4	1,09	0,60	25,57	1,32
KP_{Cr}^{690}	min	2,1	1,09	0,60	11,43	0,19
	max	9,4	3,91	0,60	11,43	3,01

Анализ функции $Cr_{кар}^{690}$ показывает, что максимальное количество хрома в карбидах 73,3 % имело место при максимальном содержании в чугуне Cr, минимальном количестве C и Mn и 2,2 % Ni. При этом химическом составе, после отжига при 690 °C, в чугуне образовывались высокохромистые карбиды $Cr_{23}C_6$, содержащие минимальное количество углерода (5,5 %) и железа. Увеличение содержания никеля до 1,32 % не оказало существенного влияния на растворимость углерода в аустените, что позволило достигнуть максимальной концентрации хрома в металлической основе. При 2,2 % никеля наблюдали максимальное количество хрома в карбидах (см. табл. 2), что связано со снижением растворимости углерода в основе и трансформацией карбидной фазы в высоко-

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

хромистые карбиды $(Cr,Fe)_7C_3$. Это подтверждает ранее полученные результаты [10].

Минимальное содержание хрома в основе (см. табл. 2) наблюдали при минимальном количестве Cr в чугунах и максимальном количестве Mn и Ni при 3,2 % C. Повышение концентрации углерода свыше 3,2 % способствовало образованию карбидов Me_7C_3 , легированных хромом с большим содержанием углерода (8,8 %), что уменьшило количество карбидной фазы и незначительно повысило содержание хрома в основе.

Наименьшее значение коэффициента K_{Cr}^{690} (2,1) установлено при минимальном содержании в чугунах C, Cr, Mn и Ni (см. табл. 2). В процессе отжига цементит трансформировался в карбиды Fe_7C_3 , содержащие большее количество хрома.

Максимальное значение коэффициента K_{Cr}^{690} (9,4) наблюдали при максимальной концентрации углерода и никеля при минимальном количестве Mn и Cr, что связано с образованием большого количества карбидов Fe_7C_3 , стабилизированных хромом при отжиге, и значительным обеднением металлической основы на хром. Зависимости содержания хрома в карбидах от количества в чугунах C, Cr, Mn и Ni на разных уровнях плана представлены на рис. 3.

Увеличение содержания Mn и Ni в чугунах изменяло металлическую основу от ферритной до аустенитной. При формировании основы в виде аустенита растворимость углерода резко повышалась. Дальнейшее легирование чугуна марганцем способствовало возрастанию, а никелем – снижению растворимости углерода в аустенитной основе.

Как показано в [17], соотношение Cr / C определяет тип образующегося карбида. При снижении концентрации атомов активного углерода наблюдается образование низкоуглеродистых хромсодержащих карбидов $Me_{23}C_6$ (5,5 % C), которые в процессе отжига трансформируются в Me_7C_3 . При возрастании доли активного углерода происходит образование Me_3C (6,7 % C), Me_7C_3 (8,8 % C) и Me_3C_2 (12,5 % C) [10]. При 0,2 % Ni и 5,4 % Mn растворимость углерода в основе повысилась, а количество активного углерода снизилось. В целом, увеличение количества углерода в чугунах вызвало в процессе отжига образование

высокохромистых карбидов Cr_7C_3 (9,0 % C) и Cr_3C_2 (13,3 % C) (см. рис. 3).

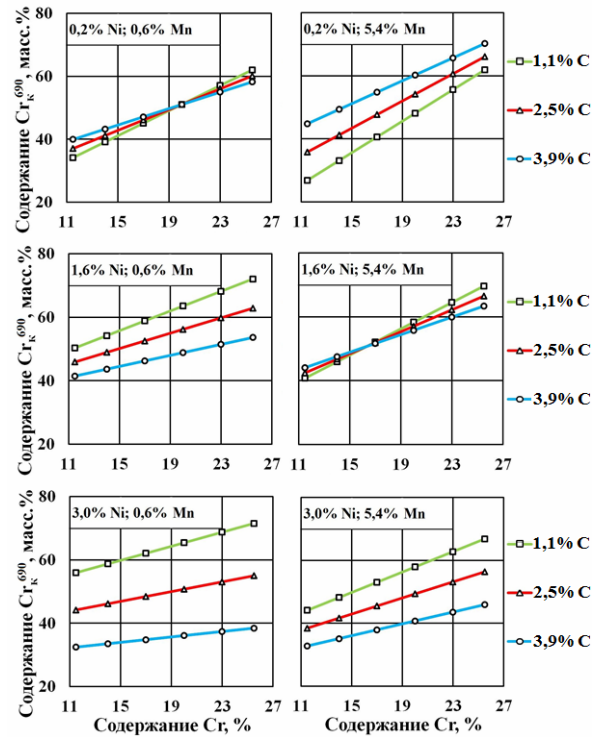


Рис. 3. Влияние C, Cr, Mn и Ni на содержание Cr_K^{690}

Fig. 3. Influence of C, Cr, Mn and Ni on the content Cr_K^{690}

В чугунах, содержащих 11,5 % Cr, 0,6 % Mn и 0,2 % Ni, после отжига наблюдались карбиды Me_3C и Me_7C_3 , стабилизированные хромом. Повышение содержания углерода в этом чугунах увеличило содержание хрома в карбидах (см. рис. 3) из-за увеличения доли карбидов Me_7C_3 в результате трансформации цементита, что согласуется с данными [3, 10, 11]. Легирование чугуна марганцем увеличивало растворимость углерода в основе и повышало концентрацию хрома в карбидах.

Рост содержания хрома в чугунах повышал его концентрацию в карбидах, а увеличение углерода снижало. Таким образом, процессы, протекающие в карбидной фазе, должны оказывать влияние и на содержание хрома в основе (рис. 4).

При увеличении содержания хрома в чугунах, формирование карбидов различных типов приводит к нарушению пропорционального прироста его концентрации в металлической основе.

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

С повышением содержания углерода в чугунае наблюдается снижение концентрации Cr в его основе. Это связано с приростом при отжиге количества карбидов с высоким содержанием хрома, не зависимо от содержания марганца и никеля. Наиболее сильное влияние углерода на $Cr_{осн}^{690}$ проявлялось при увеличении его концентрации до 2,5 % (см. рис. 4).

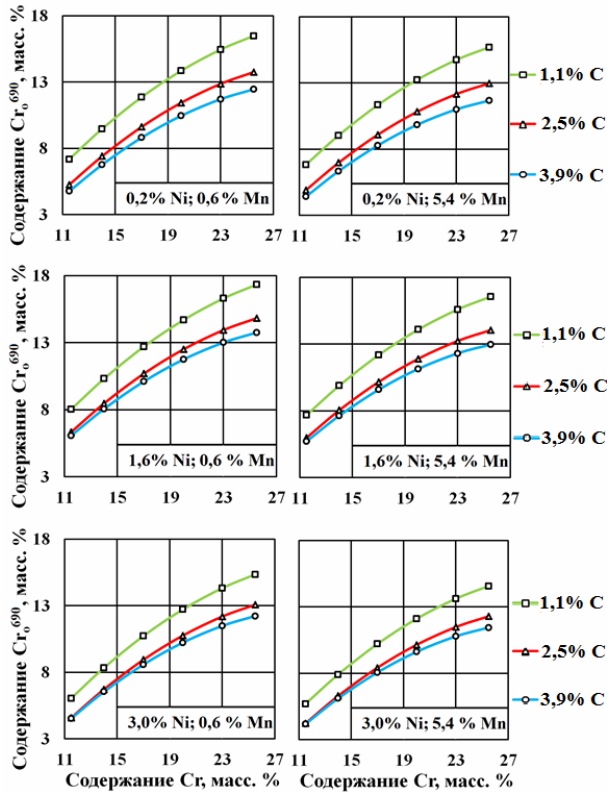


Рис. 4. Влияние C, Cr, Mn и Ni на содержание Cr_0^{690}

Fig. 4. Influence of C, Cr, Mn and Ni on the content Cr_0^{690}

Влияние никеля проявлялось в стабилизации им аустенита и изменении растворимости углерода в основе.

Специфическое влияние марганца на содержание хрома в карбидах и основе, после отжига чугуна, связано с двойственной природой марганца и его распределением между фазами. При низких концентрациях марганца до 1,0 % в высокохромистом чугунае Mn преимущественно сосредотачивается в металлической основе. Доля марганца в карбидах увеличивается при повышении содержания марганца в чугунае или снижении в нем количества хрома [3].

Совместное влияние C, Cr, Mn и Ni на коэффициент распределения хрома (KP_{Cr}^{690}) показано на рис. 5.

Влияние углерода на распределение хрома связано с изменением количества и типа образующихся карбидов. Хром, обладая большим сходством с углеродом, чем железо, марганец и никель, вступает с ним во взаимодействие, однако, в процессе охлаждения образуются неравновесные структуры. В процессе термической обработки наблюдалось формирование равновесных структур при используемой температуре отжига.

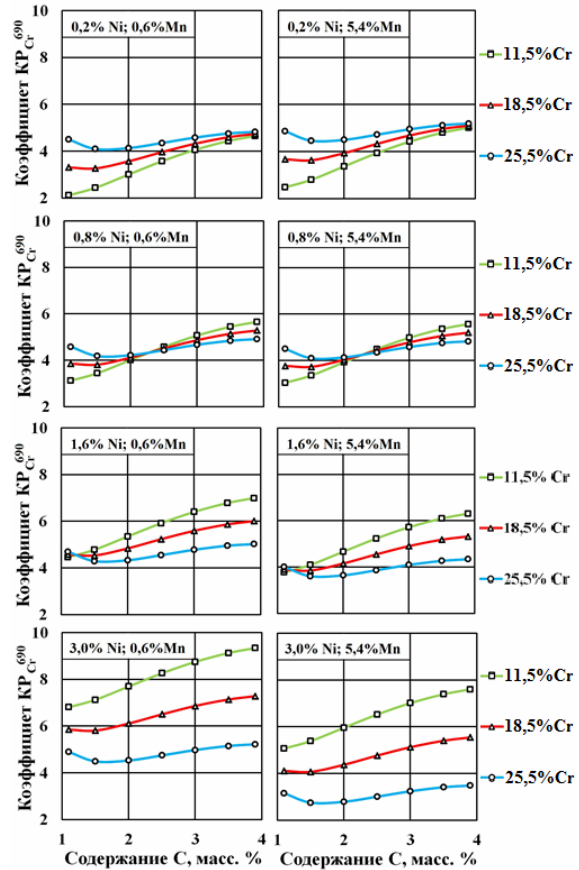


Рис. 5. Влияние C, Mn, Cr и Ni на межфазное распределение хрома – KP_{Cr}^{690}

Fig. 5. Influence of C, Mn, Cr and Ni on the interphase distribution of chromium – KP_{Cr}^{690}

В чугунах, содержащих 11,5 % Cr, 1,1 % C, 0,6 % Mn и 0,2 % Ni, образовывались карбиды Me_7C_3 . Рост содержания хрома в чугунае повышал его количество в карбидах и соответственно увеличивал значение KP_{Cr}^{690} (см. рис. 5). При увеличении содержания углерода в чугунае од-

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

новременно протекали процессы увеличения количества карбидов и постепенного замещения карбидов Me_7C_3 карбидами цементитного типа. Преобладание процесса образования карбидов существенно снижало концентрацию хрома в основе и увеличивало значение KP_{Cr}^{690} , несмотря на то, что карбиды Me_3C содержали меньшее количество хрома, чем Me_7C_3 .

При содержании в чугуна хрома более 18,5 % процесс образования карбидов Me_3C не наблюдался. Увеличение количества карбидов Me_7C_3 , со значительно большей концентрацией хрома, чем в цементите, способствует обеднению металлической основы по хром и повышает неравномерность его распределения (см. рис. 5).

Рост количества марганца в чугуна, с одной стороны, увеличивает растворимость углерода в основе и снижает количество карбидов. С другой стороны, вызывает повышение концентрации хрома в карбидах вследствие процессов замещения атомов марганца атомами хрома при формировании равновесных фаз с более низким уровнем свободной энергией. Так, при содержании 0,2 % Ni марганец практически не оказывал влияния на распределение хрома после отжига. Неравномерность распределения хрома в чугуна оставалась неизменной при содержании никеля вплоть до 1,6 % (см. рис. 5).

При 3,0 % Ni увеличение содержания марганца в чугуна снижало коэффициент KP_{Cr}^{690} , что связано с образованием устойчивого аустенита с высокой растворимостью углерода. Влияние марганца, способствуя растворимости углерода в основе, преобладало над качественно противоположным влиянием никеля.

Увеличение количество карбидов повышало концентрацию никеля в основе и неравномерность распределения хрома в основе. Особенно сильное влияние никеля проявлялось в чугунах, содержащих 11,5 % Cr. Прирост концентрации никеля в чугуна с 0,2 % до 3,0 % при содержании 1,1 % C повысил значение коэффициента KP_{Cr}^{690} с 2,1 до 6,8, а при 3,9 % C с 4,6 до 9,4 (см. рис. 5).

Анализ областей, содержащих различный уровень хрома в основе после отжига при 690 °C (рис. 6), позволил определить оптимальные составы чугунов для различных условий эксплуатации. Для изделий из чугуна, эксплуа-

тируемых в коррозионной среде, при содержании хрома в основе не менее 12 %, оптимальное содержание элементов должно составлять 1,0–1,6 % Ni, до 1,0 % Mn, до 2,5 % C при 19,5–25,5 % Cr (см. рис. 6).

Для изделий, эксплуатируемых в условиях абразивного изнашивания, химический состав регламентируется ГОСТ 7769-82 и составляет 2,4–3,6 % C, 1,5–2,5 % Mn и 19–25 % Cr. Твердость этого чугуна после его нормализации и низкого отпуска составляет 330–610 НВ [4], а после отжига при 690 °C 41–54 HRC, что соответствует требованиям ГОСТ 7769-82. Содержание хрома в основе этого чугуна, после термической обработки, составляет 9,8–12,2 %, что не обеспечивает коррозионной стойкости.

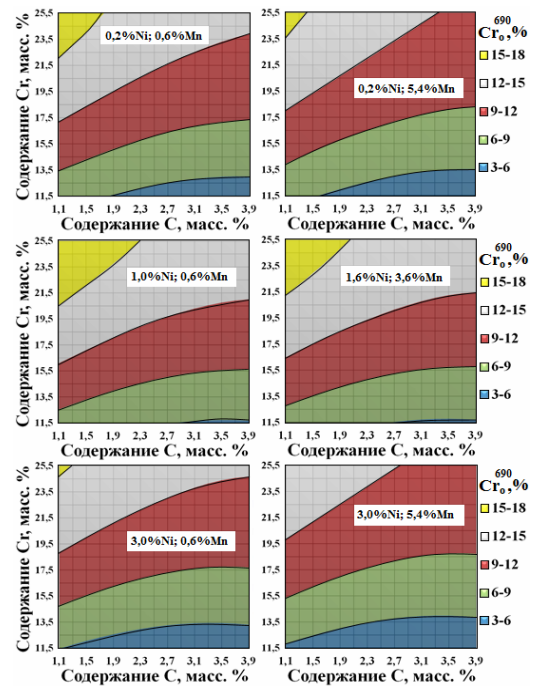


Рис. 6. Влияние C, Mn, Cr и Ni на содержание Cr_{690}

Fig. 6. Influence of C, Mn, Cr and Ni on the content Cr_{690}

Научная новизна и практическая значимость

Установлено, что основными факторами, определяющими величину коэффициента межфазного распределения хрома в системе Fe–C–Cr–Mn–Ni, являются: количественное содержание элементов и их взаимное воздействие на процессы карбиобразования.

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Полученные регрессионные зависимости позволяют спрогнозировать содержание хрома в металлической основе и могут быть использованы при разработке новых составов чугунов и режимов их термической обработки.

Выводы

1. Характер влияния марганца на содержание хрома в металлической основе чугуна неоднозначен. Марганец, повышая концентрацию

хрома в карбидах, способствует его снижению в основе. Одновременно с этим, повышая растворимость углерода в металлической матрице, марганец содействует растворению в ней карбидов и увеличивает содержание хрома.

2. После отжига чугуна в течение 9 часов при 690 °С максимальная концентрация хрома в основе достигается при 1,3 % никеля, минимальных количествах углерода и марганца.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Вакуленко, І. О. Структурний аналіз в матеріалознавстві / І. О. Вакуленко. – Дніпропетровськ : Маковецький, 2010. – 124 с.
2. Влияние режимов термической обработки на перераспределение легирующих элементов в высокохромистом чугуне / В. З. Куцова, М. А. Ковзель, А. В. Кравченко, А. В. Животович // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 2007. – № 3, ч. 2. – С. 33–51.
3. Волчок, И. П. Влияние легирования и термической обработки на распределение элементов и свойства высокохромистых чугунов / В. В. Нетребко, И. П. Волчок // *Науч. вестн. Донбас. гос. машиностр. акад. : сб. науч. тр. / Донбас. гос. машиностр. акад. – Краматорск, 2015. – № 3 (18Е). – С. 52–59.*
4. ГОСТ 7769-82. Чугун легированный для отливок со специальными свойствами. Марки. – Введ. 1983–01–01. – Москва : Изд-во стандартов, 1982. – 15 с.
5. Гудремон, Э. Специальные стали / Э. Гудремон. – Москва : Металлургия, 1966. – Т. 1. – 736 с.
6. Гуляев, А. П. *Металловедение* / А. П. Гуляев. – Москва : Металлургия, 1978. – 648 с.
7. Куцова, В. З. Влияние температуры нагрева на формирование структуры, фазовый состав и свойства высокохромистых чугунов в исходном и термообработанном состоянии / В. З. Куцова, М. А. Ковзель, А. В. Кравченко // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 2008. – № 1. – С. 35–50.
8. Малахов, А. И. Основы металловедения и теории коррозии / А. И. Малахов, А. П. Жуков. – Москва : Высш. шк., 1978. – 192 с.
9. Межфазное распределение химических элементов в комплексно-легированном белом чугуне / В. Г. Ефременко, А. П. Чейлях, Т. В. Козаревская, К. Шимидзу, Ю. Г. Чабак, А. В. Ефременко // *Вісн. Приазов. держ. техн. ун-ту. Серія: Технічні науки : зб. наук. пр. / Приазов. держ. техн. ун-т. – Маріуполь, 2014. – Вип. 28. – С. 89–99.*
10. Нетребко, В. В. К вопросу образования карбидов Fe₃C и Fe₇C₃ в высокохромистых чугунах / В. В. Нетребко // *Наука та прогрес транспорту.* – 2016. – № 3 (63). – С. 138–147. doi: 10.15802/stp2016/74736.
11. Нетребко, В. В. Особенности термической обработки высокохромистых чугунов легированных Mn и Ni / В. В. Нетребко, И. П. Волчок // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні.* – 2016. – № 1. – С. 53–57.
12. Сильман, Г. И. Диаграмма состояния сплавов системы Fe–C–Mn и некоторые структурные эффекты в этой системе. Ч. 1. Межфазное распределение марганца / Г. И. Сильман // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 2005. – № 2. – С. 11–15.
13. Структурно и неструктурно чувствительные свойства хромистых чугунов / А. А. Кириллов, В. Д. Белов, Е. В. Рожкова, А. Ю. Дядькова, И. Е. Зуев // *Черные металлы.* – 2007. – № 9 – С. 7–13.
14. Чабак, Ю. Г. Структурные изменения в комплекснолегированном белом чугуне при дестабилизирующем нагреве / Ю. Г. Чабак, В. Г. Ефременко, Р. Р. Станишевский // *Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна.* – Дніпропетровськ, 2011. – Вип. 38. – С. 229–232.
15. Чейлях, А. П. Экономнолегированные метастабильные сплавы и упрочняющие технологии / А. П. Чейлях. – Харьков : ННЦ ХФТИ, 2003. – 212 с.
16. Цыпин, И. И. Белые износостойкие чугуны. Структура и свойства / И. И. Цыпин. – Москва : Металлургия, 1983. – 176 с.
17. Цыпин, И. И. Белые износостойкие чугуны – эволюция и перспективы / И. И. Цыпин // *Литейное пр-во.* – 2000. – № 9. – С. 15–16.

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

18. Analysis of the Structure and Abrasive Wear Resistance of White Cast Iron With Precipitates of Carbides / D. Kopyciński, M. Kawalec, A. Szczęsny, R. Gilewski, S. Piasny // Archives of Metallurgy and Materials / Institute of metallurgy and materials science of Polish academy of sciences. – 2013. – Vol. 58. – Iss. 3. – P. 973–976. doi: 10.2478/amm-2013-0113.
19. Belikov, S. Manganese influence on chromium distribution in high-chromium cast iron / S. Belikov, I. Volchok, V. Netrebko // Archives of Metallurgy and Materials / Institute of metallurgy and materials science of Polish academy of sciences. – 2013. – Vol. 58. – Iss. 3. – P. 895–897. doi: 10.2478/amm-2013-0095.
20. Gierek, A. Zeliwo stopowe jako tworzywo konstrukcyjne / A. Gierek, L. Bajka. – Katowice : Slask, 1976. – 230 p.

В. В. НЕТРЕБКО^{1*}, І. П. ВОЛЧОК²

^{1*}Каф. «Обладнання та технологія зварювального виробництва», Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, Запоріжжя, Україна, 69063, тел. +38 (050) 486 27 40, ел. пошта olgavn@ukr.net, ORCID 0000-0003-3283-0116

²Каф. «Композиційні і порошкові матеріали та технології», Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, Запоріжжя, Україна, 69063, тел. +38 (061) 769 83 51, ел. пошта tmzntu@gmail.com, ORCID 0000-0003-1580-0556

ВПЛИВ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ЧАВУНУ НА РОЗПОДІЛ СR ПОМІЖ ФАЗАМИ ПІСЛЯ ВІДПАЛУ ПРИ 690 °С

Мета. У науковій роботі необхідно встановити вплив хімічного складу Fe–C–Cr–Ni–Mn чавуну на вміст хрому в металевій основі та карбідах, а також коефіцієнт розподілу хрому поміж фазами після відпалу при 690 °С (K_{Cr}^{690}). **Методика.** Досліджували чавуни, які містили 1,09–3,91 % С; 11,43–25,57 % Cr; 0,6–5,4 % Mn; 0,19–3,01 % Ni та 0,8–1,2 % Si. Аналіз розподілу хрому виконували з використанням методів математичної статистики. Чавун плавив в індукційній печі ємністю 60 кг. **Результати.** Використання методу активного планування експерименту з матрицею 2^{4-1} дозволило визначити регресійні залежності концентрації хрому в основі та карбідах, а також коефіцієнт його розподілу поміж фазами від вмісту в чавуні С, Cr, Mn та Ni. Хром після відпалу переважно концентрувався в карбідах. Вміст хрому в основі змінювався від 3,94 % при 3,23 % С, 5,4 % Mn, 11,43 % Cr та 3,01 % Ni – до 17,43 % при 1,09 % С, 0,60 % Mn, 25,57 % Cr та 1,32 % Ni. Найменше значення коефіцієнту розподілу K_{Cr}^{690} дорівнювало 2,1 в чавуні, який містив 1,09 % С, 0,6 % Mn, 11,43 % Cr та 0,19 % Ni, а найбільше – 9,4 при 3,91 % С, 0,6 % Mn, 11,43 % Cr та 3,01 % Ni. Розподіл хрому визначався кількістю та типом карбідів, що утворювались. Під час відпалу склад карбідів змінювався внаслідок конкурування елементів, що утворюють карбіди, і заміщенням атомів заліза та марганцю на атоми хрому. **Наукова новизна.** Авторами отримані регресивні залежності вмісту хрому в основі, карбідах та коефіцієнт його розподілу поміж фазами від хімічного складу Fe–C–Cr–Ni–Mn чавуну після відпалу при 690 °С. **Практична значимість.** Отримані залежності дозволяють прогнозувати вміст хрому в металевій основі та можуть бути використані при розробці нових складів зносостійких чавунів, а також при виборі режимів термічної обробки.

Ключові слова: чавун; хром; розподіл; карбід; металева основа

В. В. NETREBKO^{1*}, І. П. VOLCHOK²

^{1*}Dep. «Equipment and Technology of Welding Production», Zaporizhzhia National Technical University, Zhukovskiy St., 64, Zaporizhzhia, Ukraine, 69063, tel. +38 (050) 486 27 40, e-mail olgavn@ukr.net, ORCID 0000-0003-3283-0116

²Dep. «Composite and Powder Materials and Technologies», Zaporizhzhia National Technical University, Zhukovskiy St., 64, Zaporizhzhia, Ukraine, 69063, tel. +38 (061) 769 83 51, e-mail tmzntu@gmail.com, ORCID 0000-0003-1580-0556

INFLUENCE OF THE CAST IRON'S CHEMICAL COMPOSITION ON THE INTERPHASE DISTRIBUTION OF CR AFTER ANNEALING AT 690 °С

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Purpose. The article is aimed to determine effect of the chemical composition of Fe-C-Cr-Mn-Ni cast iron on the chromium content in the metallic base, carbides and the coefficient of interphase distribution of chromium after annealing at 690 ° C (KP_{Cr}690). **Methodology.** Cast irons containing 1.09–3.91% C; 11.43–25.57% Cr; 0.6–5.4% Mn; 0.19–3.01% Ni and 0.8–1.2% Si were investigated. The analysis of chromium distribution was carried out using mathematical statistics methods. Cast iron was melted in induction furnace with a capacity of 60 kg. **Findings.** The use of methods of active planning of the experiment 2⁴⁻¹ allowed us to establish regression dependencies of the chromium concentration in the base and carbides, as well as its interphase distribution coefficient on the C, Mn, Cr and Ni content in the cast iron. Chromium, after annealing, was mainly concentrated in carbides. The chromium content of the base varies from 3.94% at 3.23% C, 5.4% Mn, 11.43% Cr and 3.01% Ni to 17.43% at 1.09% C, 0.60% Mn, 25.57% Cr and 1.32% Ni. The minimum value of the distribution coefficient of CRC690 was 2.1 in cast iron, of composition 1.09% C, 0.6% Mn, 11.43% Cr and 0.19% Ni, maximum 9.4 at 3.91% C, 0, 6% Mn, 11.43% Cr and 3.01% Ni. The distribution of chromium was determined by the amount and type of carbides formed. During annealing, the carbides' composition was formed as a result of carbide-forming elements contention and replacement of iron and manganese atoms by chromium atoms. **Originality.** Authors obtained regression dependencies of the chromium content in the base, carbides and its interfacial distribution coefficient on the chemical composition of Fe-C-Cr-Mn-Ni cast iron after annealing at 690 ° C. **Practical value.** The obtained dependencies allow predicting the chromium content in the metallic base and may be used during the elaboration of the new wear resistant cast irons compositions, as well as in the choice of heat treatment regimes.

Keywords: cast iron; chromium; distribution; carbide; metallic base

REFERENCES

1. Vakulenko, I. O. (2010). *Strukturnyi analiz v materialoznavstvi*. Dnipropetrovsk: Makovetskyi.
2. Kutsova, V. Z., Kovzel, M. A., Kravchenko, A. V., & Zhivotovich, A. V. (2007). Vliyaniye rezhemov termicheskoy obrabotki na raspredeleniye legiruyshchekh elementov v vysokokhromistom chugune. *Metal Science and Heat Treatment*, 3 (2), 33-51.
3. Volchok, I. P., Netrebko, V. V. (2015). Effect of alloying and heat treatment on the distribution of the elements and properties of high chrome cast iron. *Scientific bulletin of DSEA*, 3 (18E), 52-59.
4. Alloy cast iron for castings of special properties. Grades, State Standard 7769-82 (1982).
5. Gudremont, E. (1966). *Spetsialnyye stali* (Vol. 1). Moscow: Metallurgiya.
6. Gulyaev, A. P. (1978). *Metallovedeniye*. Moscow: Metallurgiya.
7. Kutsova, V. Z., Kovzel, M. A., & Kravchenko, A. V. (2008). Vliyaniye temperatury nagreva na formirovaniye struktury, fazovyy sostav i svoystva vysokokhromistyykh chugunov v iskhodnom i termoobrabotannom sostoyanii. *Physical Metallurgy and Heat Treatment of Metals*, 1, 35-50.
8. Malakhov, A. I., & Zhukov, A. P. (1978). *Osnovy metallovedeniya i teorii korrozii*. Moscow: Vysshaya shkola.
9. Efremenko, V. G., Cheiliakh, O. P., Kozarevska, T. V., Shimizu, K., Chabak, Y. G., & Efremenko, O. V. (2014). Phase chemical elements distribution in complex-alloyed white cast iron. *Reporter of the Priazovskiy state technical university. Section: Technical sciences*, 28, 89-99.
10. Netrebko, V. V. (2016). About the issue of carbides Fe₃C and Fe₇C₃ formation in high-chromium cast irons. *Science and Transport Progress*, 3 (63), 138-147. doi:10.15802/stp2016/74736
11. Netrebko, V. V., Volchok, I. P. (2016). Peculiarities of heat treatment of high-chromium cast irons alloyed by Mn and Ni. *Innovative materials and technologies in metallurgy and mechanical engineering*, 1, 53-57.
12. Silman, G. I. (2005). Diagramma sostoyaniya splavov sistemy Fe-C-Mn i nekotoryye strukturnyye efekty v etoy sisteme. Mezhfaznoye raspredeleniye margantsa. *Metal Science and Heat Treatment*, 2, 11-15.
13. Kirillov, A. A., Belov, V. D., Rozhko, Y. V., Diadkova, A. Y., & Zueva, I. E. (2007). Strukturno i nestrukturno chuvstvitelnyye svoystva khromistyykh chugunov. *Stahl und Eisen*, 9, 7-13.
14. Chabak, Y. G., Efremenko, V. G., & Stanishevskiy, R. R. (2011). Structure changes in the complex-alloyed white cast iron during destabilizing heating. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*, 38, 229-232.
15. Cheilyakh, A. P. (2003). *Ekonomnolegirovannyye metastabilnyye splavy i uprochnyayushchiye tekhnologii*. Kharkov: National Science Center Kharkov Institute of Physics and Technology.
16. Tsylin, I. I. (1983). *Belyye iznosostoykiye chuguny. Struktura i svoystva*. Moscow: Metallurgiya.
17. Tsylin, I. I. (2000). Belyye iznosostoykiye chuguny – evolyutsiya i perspektivy. *Foundry*, 9, 15-16.
18. Kopyciński, D., Kawalec, M., Szczęsny, A., Gilewski, R., & Piasny, S. (2013). Analysis of the Structure and Abrasive Wear Resistance of White Cast Iron with Precipitates of Carbides. *Archives of Metallurgy and Materials*, 58 (3), 973-976. doi:10.2478/amm-2013-0113

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

19. Belikov, S., Volchok, I., & Netrobko, V. (2013). Manganese influence on chromium distribution in high-chromium cast iron. *Archives of Metallurgy and Materials*, 58 (3), 895-897. doi:10.2478/amm-2013-0095
20. Gierek, A., & Bajka, L. (1976). *Zeliwo stopowe jako tworzywo konstrukcyjne*. Katowice: Slask Publ.

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. И. А. Вакуленко (Украина); д.т.н., проф. А. А. Митяевым (Украина)

Поступила в редколлегию: 15.03.2017

Принята к печати: 12.07.2017