

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

### УДК 669.15

В. В. НЕТРЕБКО<sup>1\*</sup>, И. П. ВОЛЧОК<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>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

<sup>2</sup>Каф. «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 Mn

**Цель.** В научной работе предполагается рассмотреть получение зависимостей содержания марганца в металлической основе ( $Mn_0$ ) и коэффициента его межфазного распределения ( $KP_{Mn}$ ) от химического состава чугуна в системе Fe–C–Cr–Ni–Mn. **Методика.** Исследовали чугуны, содержащие 1,09...3,91 % C, 0,6...5,4 % Mn, 11,43...25,57 % Cr и 0,19...3,01 % Ni. Для построения математической модели распределения марганца использовали метод активного планирования эксперимента. Чугун выплавляли в индукционной печи с основной футеровкой емкостью 60 кг. **Результаты.** Марганец, являясь карбидообразующим элементом, распределялся между карбидами и металлической основой. При помощи методов математической статистики установлены регрессионные зависимости концентрации марганца в основе и коэффициента его межфазного распределения от содержания в чугуне C, Mn, Cr и Ni. Концентрация марганца в основе изменялась от 0,37 % при 1,09 % C, 0,6 % Mn, 11,43 % Cr и 3,01 % Ni до 5,79 % при 1,09 % C, 5,4 % Mn, 25,57 % Cr и 0,19 % Ni. Минимальное значение коэффициента межфазного распределения составило 0,16 в чугуне, содержащем 1,09 % C, 0,6 % Mn, 25,57 % Cr и 3,01 % Ni. При значениях коэффициента  $KP_{Mn}$  меньше 1, марганец преимущественно концентрировался в металлической основе. Максимальное значение коэффициента  $KP_{Mn}$  составило 2,48 при 3,91 % C, 0,6 % Mn, 11,43 % Cr и 0,19 % Ni. Характер распределения марганца определялся количеством карбидов и соотношением хрома и углерода, определяющим тип карбида. Состав карбидов формировался в результате конкурирования карбидообразующих элементов. **Научная новизна.** Получены регрессионные зависимости содержания марганца в основе и коэффициента его межфазного распределения от химического состава чугуна в системе Fe–C–Cr–Ni–Mn. Установлена зависимость распределения марганца от процессов формирования карбидов. **Практическая значимость.** Полученные зависимости позволяют прогнозировать содержание марганца в металлической основе и могут быть использованы при разработке новых составов износостойких чугунов.

*Ключевые слова:* чугун; марганец; распределение; карбид; металлическая основа

### Введение

Марганец является одним из основных легирующих элементов в высокохромистых чугунах. Его содержание в металлической основе определяет ее структуру и свойства. В количестве до 1,0 % марганец вводится как техно-

гическая добавка при производстве сплавов. Более высокие концентрации марганца обеспечивают получение спектра закалочных структур от мартенсита до аустенита. Марганец образует собственные карбиды и входит в состав карбидов железа и хрома, что снижает его концентрацию в металлической основе и ока-

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

зывает влияние на структуру и свойства чугуна [4, 12, 14].

Необходимость заданной концентрации марганца в металлической основе связана с его отрицательным влиянием на обрабатываемость чугуна [7] и положительным влиянием на износостойкость, особенно, при ударных нагрузках [11, 2].

Предельная растворимость марганца в  $\alpha$ -фазе в системе Fe – Mn составляет около 3,5 % [5]. Марганец с  $\gamma$ -железом образует ряд непрерывных твердых растворов. Таким образом, он преимущественно концентрируется в высокоуглеродистых фазах (аустените и карбидах). По данным [4], соотношение количества марганца в карбидах к его содержанию в сплаве составляет 4:1, при этом повышение содержания марганца в сплаве не оказывает влияния на это соотношение. При увеличении содержания углерода количество марганца в карбидах снижается, что объясняется различной степенью обеднения металлической основы. Равновесное отношение марганца в карбидах к его содержанию в основе устанавливается после довольно продолжительной выдержки при высоких температурах. Следует отметить, что карбид  $Mn_3C$  стабилен при температурах свыше 900 °C. Карбид  $Fe_3C$  в системе Fe – C соответствует карбид  $Mn_7C_3$  в системе Mn – C [8].

Межфазное распределение марганца в системе Fe – C – Mn в достаточной степени исследовано Г. И. Сильманом [8 – 10]. В работе [8] показано, что распределение марганца между карбидами и аустенитом, а также между аустенитом и ферритом зависит от его содержания и температуры. По мере увеличения содержания марганца в чугуне от 0,26 до 35,69 % коэффициент распределения марганца снижался с 2,5 до 1,18. Повышение температуры закалки до 1 100 °C понизило коэффициент распределения марганца до 1,01 при 35,69 % Mn. В работе так же отмечается, что при 1 140–1200 °C марганец стабилизирует карбид  $(Fe,Mn)_7C_3$ .

В работе [9] показано, что в условиях эвтектоидного равновесия в цементите растворяется до ~ 30 % Mn, а в карбиде  $Fe_7C_3$  – до ~ 37,5 % Mn. Увеличение концентрации марганца свыше 25 % вызывает постепенное замещение легированного цементита вторичными карбидами  $Mn_7C_3$ . Образование эвтектоидной смеси из феррита и этих карбидов наблюдается при со-

держании марганца свыше 3–5 %. Вследствие образования вторичных карбидов содержание марганца в эвтектоидном аустените снижается с 29,6 % при 1160 °C до 13,2 % при 570 °C.

По данным [10], в системе Fe – C – Mn для получения чугунов с высокой твердостью матрицы содержание марганца должно составлять 2–5 %.

Авторами [6] отмечается, что в системе Fe – C – Mn образуется карбид  $(Fe,Mn)_3C$ , в котором марганец растворяется в больших количествах, при этом растворимость марганца уменьшается с понижением температуры. В этой системе, при содержании марганца более 20 %, образуется карбидная фаза  $(Mn,Fe)_{23}C_6$ , представляющая собой карбид марганца, в котором растворено железо.

Легирование чугунов хромом, обладающим более высоким сродством к углероду, чем марганец, оказывает влияние на процессы карбидообразования и, как следствие, влияет на распределение марганца. Это связано с тем, что марганец и хром образуют изоморфные карбиды и возникает конкурирование этих элементов при формировании карбидной фазы.

Существенное влияние марганца на свойства высокохромистых чугунов проявляется в воздействии на процессы карбидообразования, формирования структуры металлической основы и, соответственно, на распределение хрома. В процессе охлаждения отливок, содержание хрома в карбидах повышается, что связано с замещением атомов марганца в карбидах атомами хрома [13].

И. И. Цыпиным [12] показано, что в чугунах, содержащих более 10 % Cr, распределение марганца зависит от отношения Cr/C, которое определяет тип карбида. В чугуне с 12 % Cr и 6 % Mn при 3 % C концентрация марганца в основе составляет 3,5 %, а при 2 % C – повышается до 6,5 %. В чугунах, содержащих до 1 % Mn, его концентрация в цементите в 1,5 раза выше, чем в аустените. При отношении Cr/C = 7 коэффициент распределения марганца приближается к единице. Исходя из этого, можно сделать вывод, что коэффициент распределения марганца в хромистых чугунах зависит от типа образующегося карбида хрома.

В нашей работе [3] показано, что повышение содержания хрома в чугуне уменьшает количество марганца в карбидах и, соответствен-

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

но, снижает его коэффициент межфазного распределения. В этих работах показано, что в чугунах, содержащих 11–30 % Cr, при содержании марганца до 0,6 % он практически весь находился в металлической основе. При повышении содержания марганца до 4 % и более он равномерно распределялся между карбидами и основой. Термическая обработка хромистого чугуна снижала содержание марганца в карбидах. При этом, чем выше была температура термообработки, тем больше атомов марганца замещалось атомами хрома.

Таким образом, можно сделать вывод о том, межфазное распределение марганца в высокохромистых чугунах зависит от его количества, содержания углерода и хрома, а так же других элементов и факторов, оказывающих влияние на процессы карбидообразования.

Систематизированные данные о межфазном распределении Mn в многокомпонентной системе Fe – C – Cr – Ni – Mn ограничены. Поэтому для прогнозирования структуры и свойств чугунов этой системы необходимо знать содержание марганца в металлической основе и особенности его межфазного распределения.

**Цель**

Цель работы заключалась в получении регрессионных зависимостей содержания марганца в основе и коэффициента его межфазного распределения от химического состава чугуна в системе Fe – C – Cr – Ni – Mn.

**Методика**

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

Чугун выплавляли в индукционной печи с основной футеровкой емкостью 60 кг. Содержание кремния составляло 0,8–1,2 %, серы до 0,02 %, фосфора до 0,03 %. Температура жидкого чугуна составляла 1 390–1 410 °С. Опытные чугуны исследовали в литом состоянии без термической обработки. Для выявления структурных составляющих применяли травитель Марбле. Анализ структуры производился по известным методикам [1].

Химический состав металлической основы и карбидов определяли в локальных точках на микроскопе РЕМ 106И.

Коэффициент распределения марганца ( $KP_{Mn}$ ) определяли как отношение содержания марганца в карбидах ( $Mn_k$ ) к его содержанию в основе ( $Mn_o$ ).

Таблица 1

**Матрица планирования дробного факторного эксперимента  $2^{4+1}$** 

Table 1

**Matrix of fractional factorial experiment planning  $2^{4+1}$** 

Уровни варьирования факторов		Факторы			
		C, %	Cr, %	Mn, %	Ni, %
Основной	0	2,5	18,5	3,0	1,6
Интервал	$\Delta$	1,0	5,0	1,7	1,0
Звездное плечо	1,414	1,41	7,07	2,4	1,41
	$\Delta$				
Верхние	+1	3,5	23,5	4,7	2,6
	+1,414	3,91	25,57	5,4	3,01
Нижние	4				
	-1	1,5	13,5	1,3	0,6
	-	1,09	11,43	0,6	0,19
	1,414				

**Результаты**

При первичной кристаллизации чугунов образовывались карбиды железа и хрома, легированные марганцем. Тип карбида и его состав зависел от концентрации карбидообразующих элементов и их конкурирования при его формировании, а также от изменения растворимости марганца в карбидах, в процессе остывания отливок.

Увеличение содержания марганца в чугуне практически не оказывало влияние на тип образующихся карбидов, но привело к изменению металлической основы от ферритной до аустенитной.

В результате математической обработки экспериментальных данных получены регрессионные зависимости содержания марганца в основе и коэффициента его межфазного распределения от содержания C, Mn, Cr и Ni в чугуне:

$$Mn_o = 0,72C + 0,697Mn + 0,145Cr - 0,058CMn - 0,039CCr - 0,022CNi + 0,007MnCr - 1,945;$$

$$KP_{Mn} = 6,711 - 1,383C - 0,383Mn - 0,148Cr -$$

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

$0,603\text{Ni} + 0,28\text{C}^2 + 0,004\text{Cr}^2 - 0,03\text{CCr} + 0,014\text{MnCr} + 0,088\text{MnNi} + 0,018\text{CrNi} - 0,134(\text{Cr/C})$ .

Данні уравнення являються математически верооятностними в соответствии с критеріями Стьюдента, Фишера и Кохрена. Минимальные и максимальные значения функций представлены в табл. 2.

Анализ табл. 2 показываєт, что максимальное содержание марганца в основе обеспечивается при минимальном содержании углерода и никеля и максимальном содержании хрома и марганца. Минимальное содержание марганца в основе наблюдается при минимальных количествах С, Мп, Сг и максимальном количестве Ni.

Таблица 2

**Минимальные и максимальные значения функций:  $\text{Mn}_0$  и  $\text{KР}_{\text{Mn}}$**

Table 2

**Minimum and maximum values of functions:  $\text{Mn}_0$  and  $\text{KР}_{\text{Mn}}$**

Функция	Уровень	Величина	Состав, масс. %			
			С	Мп	Сг	Ni
$\text{Mn}_0$	min	0,37	1,09	0,60	11,4 3	3,01
	max	5,79	1,09	5,40	25,5 7	0,19
$\text{KР}_{\text{Mn}}$	min	0,16	1,09	0,60	25,5 7	3,01
	max	2,48	3,91	0,60	11,4 3	0,19

Минимальное содержание марганца в карбидах, соответствующее минимальному значению  $\text{KР}_{\text{Mn}}$ , наблюдается при минимальном содержании углерода и марганца в чугунах, а также максимальных значениях хрома и никеля. Наибольшее значение коэффициента  $\text{KР}_{\text{Mn}}$  установлено при минимальном содержании в чугунах Мп, Сг и Ni, а также при максимальном содержании углерода.

Зависимости содержания марганца в основе от количества в чугунах С, Мп, Сг и Ni (рис. 1) носили линейный характер.

Повышение содержания Мп в чугунах повышало его концентрацию в основе, однако это повышение не имело пропорциональной зависимости.

При увеличении содержания хрома в чугунах концентрация марганца в основе повышалась, что связано с замещением атомов марганца атомами хрома в карбидах.

Повышение содержания углерода в чугунах увеличивало количество карбидов и, как следствие, снижало содержание Мп в основе, кроме чугунов, содержащих 11,5 % Сг и 0,6–2,0 % Мп. В этих чугунах при увеличении углерода, преимущественно формировались карбиды цементитного типа, обладающие меньшей растворимостью марганца по сравнению с карбидами  $\text{Me}_7\text{C}_3$  [7], что повышало содержание марганца в основе.

Повышение содержания Ni в чугунах уменьшало растворимость углерода в аустените, что способствовало увеличению количества карбидов и незначительно понижало содержание Мп в основе.

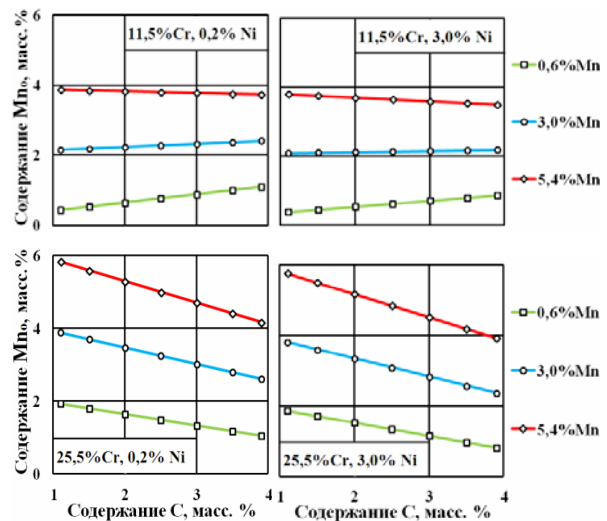


Рис. 1. Влияние С, Сг, Мп и Ni на содержание Мп в основе

Fig. 1. Influence of C, Cr, Mn and Ni on the Mn content in the base

Рис. 2 и 3 иллюстрируют влияние С и Сг на коэффициент межфазного распределения Мп в зависимости от химического состава чугунов.

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

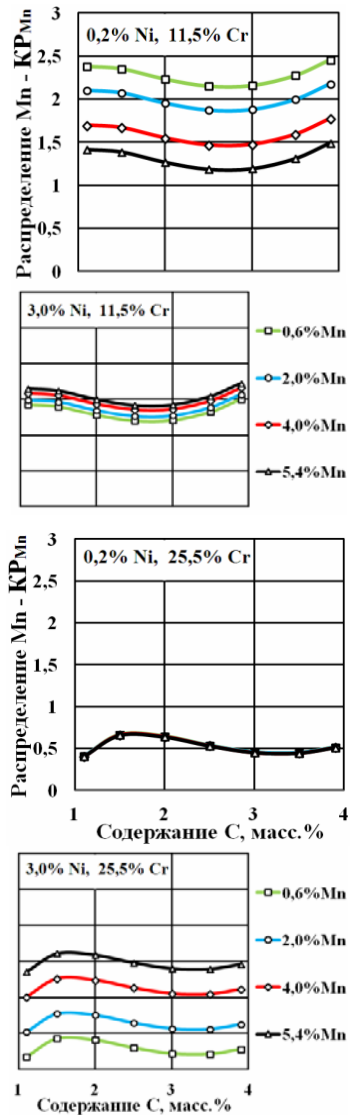


Рис. 2. Влияние C на межфазное распределение Mn в зависимости от химического состава чугуна

Fig. 2. Influence of C on the interphase distribution of Mn depending on the cast iron's chemical composition

Влияние углерода на распределение марганца объясняется изменением количества и типа образующихся карбидов. В чугунах, содержащих 11,5 % Cr и 1,1 % C, образовывались карбиды  $Me_7C_3$ . При увеличении углерода происходило постепенное замещение этих карбидов карбидами цементитного типа, обладающих меньшей растворимостью хрома и марганца, что снижало коэффициент межфазного распределения марганца. При 2,7 % C снижение концентрации хрома в карбидах изменило тер-

модинамическое равновесие элементов, образующих карбиды, что способствовало росту концентрации марганца в карбидах цементитного типа и повышало коэффициент его распределения, при дальнейшем увеличении углерода в чугуне.

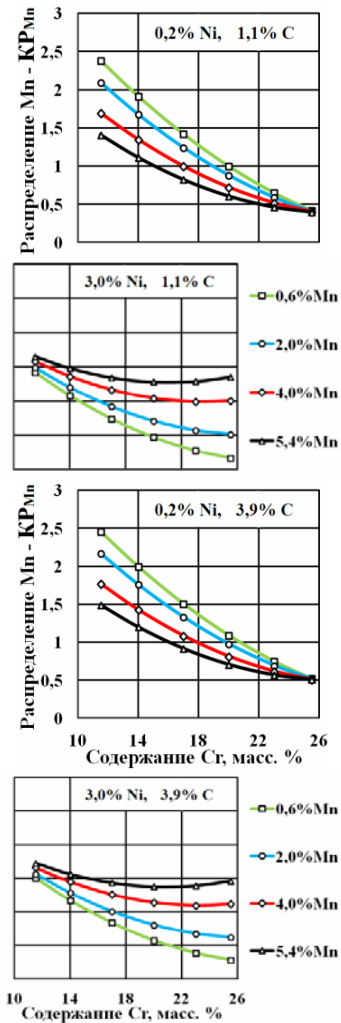


Рис. 3. Влияние Cr на межфазное распределение Mn в зависимости от химического состава чугуна

Fig. 3. Influence of Cr on the interphase distribution of Mn depending on the cast iron's chemical composition

В чугунах с 25,5 % Cr и 1,1 % C образовывались высокохромистые карбиды  $Me_{23}C_6$ , содержащие 56–66 % Cr. Увеличение содержания углерода до 1,7 % приводило к повышению количества карбидов, при этом происходило постепенное замещение карбидов  $Me_{23}C_6$  карбидами  $Me_7C_3$ , обладающими более высокой рас-

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

творимостью марганца, что повышало коэффициент распределения марганца. При дальнейшем увеличении углерода количество карбидов возрастало, что вызывало снижение коэффициента  $K_{P_{Mn}}$ . При 3,3 % C начиналось постепенное замещение карбидов  $Me_7C_3$  карбидами цементитного типа с растворимостью хрома до 20 %, что способствовало увеличению в них концентрации марганца и соответственно повышало коэффициент распределения  $K_{P_{Mn}}$ .

Повышение содержания марганца от 0,6 до 5,4 % в чугунах, содержащих 11,5 % Cr и 0,2 % Ni, понижало коэффициент распределения марганца, что объясняется образованием аустенита и повышением растворимости марганца в металлической основе.

При увеличении в чугуне никеля до 3 % аустенит образовывался при 0,6 % Mn, что снижало коэффициент распределения марганца и изменяло характера его влияния. При повышении концентрации марганца в чугуне коэффициент распределения марганца возрастал. Повышение содержания в чугуне хрома до 25,5 %, увеличивало интенсивность роста коэффициента распределения марганца по мере повышения его концентрации.

В чугунах, содержащих 25,5 % Cr и 0,2 % Ni, коэффициент распределения марганца не зависел от его количества в чугуне. Увеличение в чугуне никеля смещало этот эффект в область более низких концентраций хрома. Это связано с образованием различной металлической основы и соответственно с различной растворимостью в ней углерода.

#### Научная новизна и практическая значимость

Установлено, что основными факторами, определяющими величину коэффициента межфазного распределения марганца в комплексно легированных чугунах, является содержание в них марганца и хрома, количество и тип образующихся карбидов.

Полученные регрессионные зависимости позволяют прогнозировать содержание марганца в металлической основе и могут быть использованы при разработке новых составов износостойких чугунов.

#### Выводы

1. В Fe – C – Cr – Ni – Mn сплавах максимальное содержание марганца в основе имело место при минимальном содержании углерода и никеля и максимальном содержании хрома и марганца.

2. Максимальное значение коэффициента распределения марганца (преимущественное сосредоточение в карбидной фазе) достигалось при образовании карбидов цементитного типа в чугунах, содержащих максимальное количество углерода при минимальном содержании других легирующих элементов.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Вакуленко, І. О. Структурний аналіз в матеріалознавстві / І. О. Вакуленко. Дніпропетровськ : Маковецький, 2010. – 124 с.
2. Влияние легирования на температуру превращения «перлит–аустенит» в комплексно легированных белых чугунах / Т. В. Пастухова, В. Г. Ефременко, А. П. Чейлях [и др.] // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 1 (55). – С. 113–121. doi: 10.15802/STP2015/38255.
3. Волчок, И. П. Влияние легирования и термической обработки на распределение элементов и свойства высокохромистых чугунов / И. П. Волчок, В. В. Нетребко // Науч. вестн. Донбас. машиностроит. акад. : сб. науч. тр. – Краматорск, 2015. – № 3(18E). – С. 52–59.
4. Гудремон, Э. Специальные стали / Э. Гудремон. – Москва : Металлургия, 1966. – Т. 1. – 736 с.
5. Кубашевски, О. Диаграммы состояния двойных систем на основе железа : справочник : [пер. с англ.] / О. Кубашевски. – Москва : Металлургия, 1985. – 184 с.
6. Металловедение и термическая обработка стали : справочник / под ред. М. Л. Бернштейна, А. Г. Рахштадта. – Москва : Металлургиздат, 1961. – Т. 1. – 747 с.
7. Нетребко, В. В. Влияние химического состава высокохромистых чугунов на обрабатываемость резанием / В. В. Нетребко // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 1 (61). – С. 122–130. doi: 10.15802/stp2016/61015.

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

8. 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.
9. Сильман, Г. И. Диаграмма состояния сплавов системы Fe–C–Mn и некоторые структурные эффекты в этой системе. Ч. 2. Расчет и построение изотермических разрезом диаграммы / Г. И. Сильман // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2005. – № 4. – С. 3–9.
10. Сильман, Г. И. Сплавы системы Fe–C–Mn. Ч. 5. Особенности структурообразования в белых высокомарганцевых чугунах / Г. И. Сильман // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2006. – № 3 (609). – С. 3–8.
11. Чейлях, А. П. Экономнолегированные метастабильные сплавы и упрочняющие технологии / А. П. Чейлях. – Харьков : ННЦ ХФТИ, 2003. – 212 с.
12. Цыпин, И. И. Белые износостойкие чугуны. Структура и свойства / И. И. Цыпин. – Москва : Металлургия, 1983. – 176 с.
13. Belikov, S. Manganese Influence on Chromium Distribution in High-Chromium Cast Iron / S. Belikov, I. Volchok, V. Netrebko // *Archives of Metallurgy and Materials*. – 2013. – Vol. 58. – Iss. 3. – P. 895–897. doi: 10.2478/amm-2013-0095.
14. Gierек, A. Zeliwo stopowe jako tworzywo konstrukcyjne / A. Gierек, L. Bajka. – Katowice : Slask, 1976. – 230 p.

В. В. НЕТРЕБКО<sup>1\*</sup>, І. П. ВОЛЧОК<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Каф. «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 Mn ПОМІЖ ФАЗАМИ

**Мета.** У науковій роботі передбачається розглянути отримання залежностей вмісту марганцю в металевій основі ( $Mn_0$ ) та коефіцієнта його розподілу поміж фазами ( $K_{P_{Mn}}$ ) від хімічного складу чавуну в системі Fe–C–Cr–Ni–Mn. **Методика.** Досліджували чавуни, які містили 1,09...3,91 % C, 0,6...5,4 % Mn, 11,43...25,57 % Cr та 0,19...3,01 % Ni. Для побудови математичної моделі розподілу марганцю застосували метод активного планування експерименту. Чавун плавив в індукційній печі з лужною футеровкою ємністю 60 кг. **Результати.** Марганець як елемент, що утворює карбіди, розподілявся поміж карбідами та металеву основою. Використовуючи методи математичної статистики, були встановлені регресійні залежності концентрації марганцю в основі та коефіцієнт його розподілу поміж фазами від вмісту в чавуні C, Mn, Cr та Ni. Концентрація марганцю в основі змінювалась від 0,37 % при 1,09 % C, 0,6 % Mn, 11,43 % Cr та 3,01 % Ni до 5,79 % при 1,09 % C, 5,4 % Mn, 25,57 % Cr та 0,19 % Ni. Мінімальна величина коефіцієнту розподілу складала 0,16 в чавуні, якій містив 1,09 % C, 0,6 % Mn, 25,57 % Cr та 3,01 % Ni. Якщо величина коефіцієнту  $K_{P_{Mn}}$  була менше 1, то марганець переважно концентрувався в металевій основі. Максимальна величина коефіцієнту  $K_{P_{Mn}}$  складала 2,48 при 3,91 % C, 0,6 % Mn, 11,43 % Cr та 0,19 % Ni. Розподіл марганцю залежав від кількості карбідів та співвідношення хрому до вуглецю, що визначало тип карбіду. Склад карбідів формувалася внаслідок конкурування елементів, що утворювали карбіди. **Наукова новизна.** Отримані регресивні залежності вмісту марганцю в металевій основі та коефіцієнта його розподілу поміж фазами від хімічного складу чавуну в системі Fe–C–Cr–Ni–Mn. Встановлена залежність розподілу марганцю від процесів формування карбідів. **Практична значимість.** Отримані залежності дозволяють прогнозувати вміст марганцю в металевій основі та можуть бути використані при розробці зносостійких чавунів нового складу.

*Ключові слова:* чавун; марганець; розподіл; карбід; металева основа

V. V. NETREBKO<sup>1\*</sup>, I. P. VOLCHOK<sup>2</sup><sup>1\*</sup>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 olgavvn@ukr.net, ORCID 0000-0003-3283-0116<sup>2</sup>Dep. «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 Mn

**Purpose.** This paper focuses on obtaining the dependencies of the manganese content in the metallic base ( $Mn_0$ ) and its interphase distribution coefficient ( $KP_{Mn}$ ) on the cast iron's chemical composition in the system Fe – C – Cr – Ni – Mn. **Methodology.** The cast irons containing 1.09...3.91 % C, 0.6...5.4 % Mn, 11.43...25.57 % Cr and 0.19...3.01 % Ni have been studied. The active experiment design techniques were applied to build a mathematical model of manganese distribution. Cast iron was smelted in the induction furnace with the capacity of 60 kg, with basic lining. **Findings.** Manganese, being a carbide-forming element, distributed between carbides and the metallic base. With the use of the mathematical statistics methods, regression dependencies of the manganese concentration in the base and its interphase distribution coefficient on the C, Mn, Cr and Ni content in the cast iron were established. The manganese concentration in the base varied from 0.37 % at 1.09 % C, 0.6 % Mn, 11.43 % Cr and 3.01 % Ni to 5.79 % at 1.09 % C, 5.4 % Mn, 25.57 % Cr and 0.19 % Ni. The minimum value of the interphase distribution coefficient was 0.16 in the cast iron containing 1.09 % C, 0.6 % Mn, 25.57 % Cr and 3.01 % Ni. When the  $KP_{Mn}$  coefficient values were lower than 1, manganese concentrated predominantly in the metallic base. The maximum value of the  $KP_{Mn}$  coefficient was 2.48 at 3.91 % C, 0.6 % Mn, 11.43 % Cr and 0.19 % Ni. The manganese distribution pattern was determined by the carbides' quantity and chromium and carbon ratio that determined the carbide type. The carbides' composition was formed as a result of carbide-forming elements contention. **Originality.** Regression dependencies of the manganese content in the base and its interphase distribution coefficient on the cast iron's chemical composition in the system Fe – C – Cr – Ni – Mn have been obtained. The dependency of the manganese distribution on the carbide forming processes has been established. **Practical value.** The obtained dependencies allow predicting the manganese content in the metallic base and may be used during the elaboration of the new wear resistant cast irons compositions.

*Keywords:* cast iron; manganese; distribution; carbide; metallic base

### REFERENCES

1. Vakulenko I.O. *Strukturnyi analiz v materialoznavstvi* [Structural analysis in the material science]. Dnipropetrovsk, Makovetskiy Publ., 2010. 124 p.
2. Pastukhova T.V., Efremenko V.G., Cheiliakh A.P., Shimizu K., Chabak Yu.G. Vliyanie legirovaniya na temperaturu prevrashcheniya «perlit–austenit» v kompleksno-legirovannykh belykh chugunakh [Effect of alloying on temperature of transformation «pearlite–austenite» in complex-alloyed white cast irons]. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress*, 2015, no. 1 (55), pp. 113-121. doi: 10.15802/stp2015/38255.
3. Volchok I.P., Netrebko V.V. Vliyaniye legirovaniya i termicheskoy obrabotki na raspredeleniye elementov i svoystva vysokokhromistykh chugunov [Influence of alloying and heat treatment on the elements' distribution and properties of high-chromium cast irons]. *Sbornik nauchnykh trudov: «Nauchnyy Vestnik Donbasmkoy mashinostroitel'noy akademii»* [Proc. «Bulletin of Donbas Machine-Building Academy»], 2015, no. 3 (18E), pp. 52-59.
4. Gudremon E. *Spetsialnyye stali. T. 1* [Special steels. Vol. 1]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1966. 736 p.
5. Kubashevski O. *Diagrammy sostoyaniya dvoynykh sistem na osnove zheleza: spravochnik* [State diagrams of iron-based binary systems. Reference book]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1985. 184 p.
6. Bernshteyna M.L., Rakhshadta A.G. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka stali: spravochnik. T. 1*. [Metal science and heat treatment of steel. Reference book. Vol. 1]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1961. 747 p.
7. Netrebko V.V. Vliyaniye khimicheskogo sostava vysokokhromistykh chugunov na obrabatyvayemost rezaniyem [The Influence of chemical composition of high-chromium cast irons on the machinability]. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress*, 2016, no. 1 (61), pp. 122-130. doi: 10.15802/stp2016/61015.



## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

8. Silman G.I. Diagramma sostoyaniya splavov sistemy Fe–C–Mn i nekotoryye strukturnyye efekty v etoy sisteme. Chast 1. Mezhfaznoye raspredeleniye margantsa [State diagram of the alloys of the Fe–C–M system and some structural effects in this system. Part 1. Interphase distribution of manganese]. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov – Metal Science and Heat Treatment of Metals*, 2005, no. 2, pp. 11-15.
9. Silman G.I. Diagramma sostoyaniya splavov sistemy Fe–C–Mn i nekotoryye strukturnyye efekty v etoy sisteme. Chast 2. Raschet i postroyeniye izotermicheskikh razrezov diagrammy [State diagram of the alloys of the Fe–C–M system and some structural effects in this system. Part 2. Calculation and plotting of the isothermal sections of the diagram]. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov – Metal Science and Heat Treatment of Metals*, 2005, no. 4, pp. 3-9.
10. Silman G.I. Splavy sistemy Fe–C–Mn. Chast 5. Osobennosti strukturoobrazovaniya v belykh vysokomargantsevykh chugunakh [Alloys of the Fe–C–Mn system. Part 5. Peculiarities of the structure formation in white high-manganese cast irons]. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov – Metal Science and Heat Treatment of Metals*, 2006, no. 3 (609), pp. 3-8.
11. Cheylyakh A.P. *Ekonomnolegirovannyye metastabilnyye splavy i uprochnyayushchiye tekhnologii* [Economically alloyed metastable alloys and reinforcement technologies]. Kharkov, NNTS KHFTI Publ., 2003. 212 p.
12. Tsylin I.I. *Belye iznosostoykiye chuguny. Struktura i svoystva* [White wear resistant cast irons. Structure and properties]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1983. 176 p.
13. Belikov S., Volchok I., Ntrebko V. Manganese Influence on Chromium Distribution in High-Chromium Cast Iron. *Archives of Metallurgy and Materials*, 2013, vol. 58, issue 3, pp. 895-897. doi: 10.2478/amm-2013-0095.
14. Gierak A., Bajka L. *Zeliwo stopowe jako tworzywo konstrukcyjne*. Katowice, Slask Publ., 1976. 230 p.

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

Поступила в редколлегию: 07.09.2016

Принята к печати: 07.12.2016