

Особливості структуроутворення в економнолегованих хромомарганцевих залізовуглецевих сплавах для гірничо-металургійного обладнання

Плюта В. Л., кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, plyuta.valera@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6564-7866>

Нестеренко А. М., кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, anatnest1946@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1644-5472>

Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, Дніпро

Встановлено, що в литих хромомарганцевих сплавах системи $Fe - C - Mn - Cr$ перехідного класу (вміст вуглецю не більше 2,2 %) при певному поєднанні Mn і Cr можливе утворення кристалів високо твердого карбиду Me_7C_3 . Досліджено взаємозв'язок між фазово-концентраційними параметрами та структуроутворенням сплавів системи $Fe - C - Mn - Cr$; аналіз взаємозв'язку між фазово-концентраційними параметрами, структуроутворенням та властивостями проведений на композиціях систем $Fe - C - Mn$ та $Fe - C - Mn - Cr$ з 1,5-2,1 % C , зі мінним вмістом Mn , Cr та добавками інших легуючих елементів – Si та Ni на рівні домішок. Побудовано фазово-концентраційну діаграму кристалізації сплавів цієї системи, що розмежовує області кристалізації $P \rightarrow \gamma-Fe$, $P \rightarrow \gamma-Fe + Me_7C_3$ та $P \rightarrow (\gamma-Fe + Me_7C_3) + (\gamma-Fe + Me_7C_3)$. Показано, що економнолеговані сплави хромомарганцеві, системи $Fe - Mn - Cr - C$ з евтектикою на основі карбиду Me_7C_3 характеризуються високим рівнем ударно-абразивної зносостійкості, а результати проведених досліджень свідчать про перспективність використання економнолегованих хромомарганцевих сплавів і можуть бути рекомендовані для подальшого дослідження та застосування як зносостійкі матеріали для виготовлення деталей змінного металургійного обладнання, що експлуатуються у важких умовах абразивного та ударно-абразивного зносу.

Ключові слова: фазово-концентраційна діаграма, мікроструктура, карбід Me_7C_3 , ударно-абразивна зносостійкість, хромомарганцеві сплави.

Деталі гірничо-металургійного обладнання, призначеного для подрібнення, компактування та транспортування залізорудної сировини, шихтувальних матеріалів доменного та сталеплавильного виробництва, інших матеріалів, змінні деталі прокатних станів та машин, зазнають інтенсивного абразивного впливу різного виду, що спричиняє їх руйнування та передчасний вихід з ладу [1-3]. Зниження продуктивності у циклі виробництва, пов'язаної з

Структура, зношування, руйнування

виходом з ладу таких деталей та ремонтними паузами, є досить значним. У зв'язку з цим, проблема підвищення стійкості виробів та деталей, що експлуатуються в умовах інтенсивного абразивного зношування, є актуальним завданням сучасного матеріалознавства.

Аналіз робіт [3-9] показує, що в даний час для виробів та деталей, що експлуатуються в умовах інтенсивного абразивного впливу, використовуються в основному, 2 групи сталей та сплавів.

1. Високохромисті сталі і чавуни (X12, X12M, 30-40X13, X12Ф1, X12МФ, ИЧХ30НХ, ИЧ300Х28Н2, ИЧ280Х12М та інших), висока зносостійкість яких досягається завдяки наявності в їх структурі карбідів типу Me_3C , $Me_{23}C_6$, Me_7C_3 . Внаслідок підвищеної крихкості карбідних фаз перелічені сталі та чавуни застосовуються, як правило, для виготовлення зносостійких виробів та деталей, що не піддаються при експлуатації значним ударним навантаженням.

2. Марганцеві сталі і сплави (110Г13Л, 100Г13ХБРЛ, 110Г13ФТЛ, 130Г14ХМФАЛ, 120Г10ФЛ, 80ГСЛ, 75Г2 та інші) мають досить високий рівень ударно-абразивної зносостійкості. Однак, у разі інтенсивного масованого впливу твердих частинок їх абразивна стійкість не задовольняє умов експлуатації виробів і деталей, що виготовляються з них.

У [3-9] показано поєднання високого рівня абразивної та ударно-абразивної зносостійкості в залізовуглецевих сплавах може бути досягнуто шляхом їх спільного легування хромом і марганцем. Тому проведено дослідження особливостей структуроутворення сплавів на основі систем Fe – C – Mn та Fe – C – Mn – Cr (перехідного класу) зі зниженим вмістом вуглецю (до 2,2 %) та визначено напрями подальшого використання отриманих результатів для розробки зносостійких матеріалів, що експлуатуються за умов абразивного та ударно-абразивного впливу.

Аналіз взаємозв'язку між фазово-концентраційними параметрами, структуроутворенням і властивостями здійснювали на композиціях систем Fe – C – Mn та Fe – C – Mn – Cr з 1,5-2,1 % C, зі мінним вмістом Mn (3,56-7,06 %), Cr (2,0-7,0 %) та добавками інших легуючих елементів – Si (0,49-0,67 %) та Ni (0,3 %) (табл. 1).

Таблиця 1

Хімічний склад та показники твердості зразків досліджуваних сплавів

Table 1

Chemical composition and hardness indicators of samples of studied alloys

№ сплаву	Масова частка елементів, %				Твердість, HRC
	C	Si	Mn	Cr	
1	1,50	0,50	6,00	-	10,0
2	1,50	0,50	6,00	2,00	12,5
3	2,01	0,51	3,89	-	37,0
4	2,04	0,49	7,06	-	41,5
5	2,02	0,67	4,25	3,88	46,0
6	2,10	0,63	3,56	7,00	55,0

Проведений металографічний аналіз показав, що структура сплаву № 1 з 1,5 % С і 6,0 % Мп (табл. 1) являє собою аустеніт з виділеннями вторинного голчастого цементиту й малою кількістю розділених частинок евтектичних карбідів (в основному цементит Me_3C) між гілками дендритів аустеніту (рис. 1 а). Твердість цього сплаву мінімальна – 10 HRC.

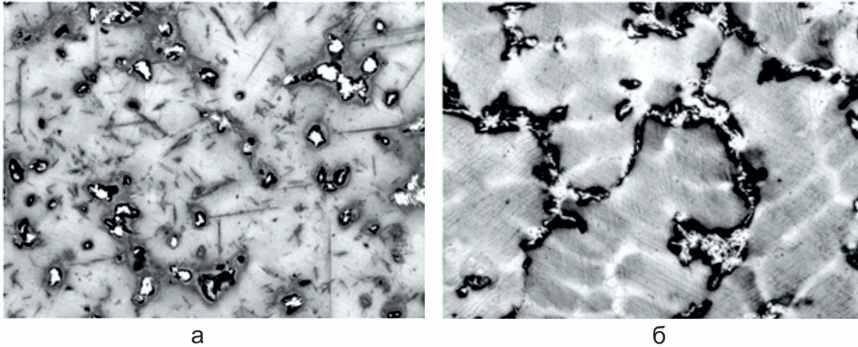


Рис. 1. Мікроструктура сплавів: а – № 1, б – № 2, $\times 200$.

Fig. 1. Microstructure of alloys: a – No. 1, b – No. 2, $\times 200$.

Легування сплаву такого типу хромом у кількості 2,0 % (табл. 1, сплав № 2) дозволило (рис. 1 б) збільшити кількість евтектичних карбідів, запобігти виділенню вторинного цементиту у вигляді крихких довгих голок та, хоч і незначно, підвищити його твердість (до 13 HRC). Ділянки темної складової, що оздоблюють евтектичні карбіди (рис. 1 б), являють собою тонко диференційований перліт.

Отже, легування дослідженого сплаву марганцем у кількості 6,0 % та додатково хромом у кількості 2,0 % сприяло розвитку евтектичної реакції $P \rightarrow \gamma\text{-Fe} + \text{Me}_3\text{C}$ з утворенням легovanого хромом цементиту.

У сплаві № 3 системи Fe – C – Mn із вмістом 2,01 % С і 3,89 % Мп (табл. 1) формується зовсім інша, типова для так названих «білих» чавунів [8, 9] структура, яка складається з дендритів аустеніту і колоній ледебуриту, що утворилися між гілками цих дендритів на останніх етапах тверднення виливків (рис. 2 а). Слід зазначити, що в аустеніті евтектичної складової колоній ледебуриту сплаву № 3, збагаченому легуючими елементами, евтектоїдний розпад на перліт не здійснюється. Тому вміст залишкового аустеніту в кінцевій структурі цього сплаву становив приблизно 30 %. У сплаві № 4 тієї ж системи Fe – C – Mn з підвищеним вмістом Мп (7,06 % – табл. 1) дещо збільшується кількість ледебуритної складової, а об'ємна частка аустеніту в кінцевій структурі зростає до 70 % (рис. 2 б). З наведених даних випливає, що в досліджених сплавах Fe – Mn – C при вмісті С 1,50-2,06 % і Мп від 3,89 до 7,06 % високотверді карбіди типу $(\text{Mn, Fe})_7\text{C}_3$ або евтектики на їх основі не утворюються.

Водночас у сплавах системи Fe – Mn – Cr – C (табл. 1), як встановлено в результаті проведеного аналізу, при певному співвідношенні концентрацій Мп і Cr, можлива реалізація евтектичного перетворення $P \rightarrow \gamma\text{-Fe} + \text{Me}_7\text{C}_3$, тобто, утворення евтектики на основі карбіду Me_7C_3 .

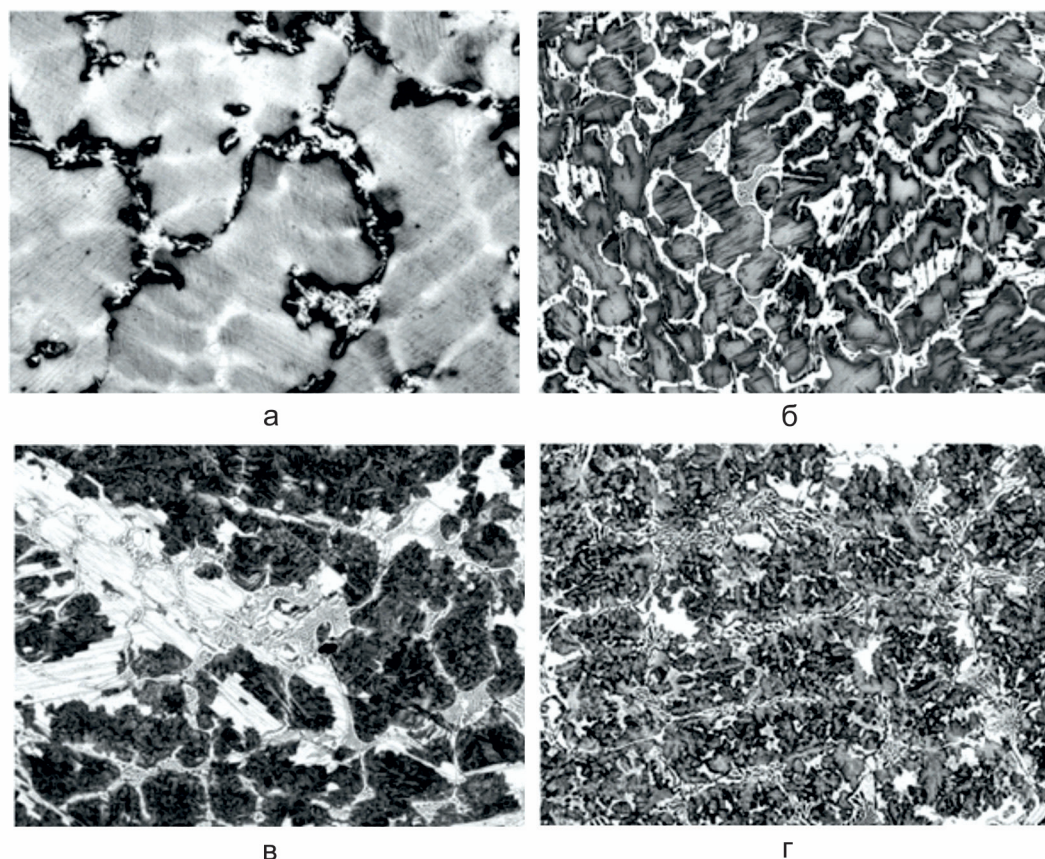


Рис. 2. Мікроструктура сплавів: а – № 3, б – № 4, в – № 5, $\times 200$, г – № 6, $\times 400$.

Fig. 2. Microstructure of alloys: а – No. 3, б – No. 4, в – No. 5, $\times 200$, г – No. 6, $\times 400$.

Як випливає з рис. 2 г та рис. 3 а, зазначені евтектики на основі карбиду Me_7C_3 з колоніальною будовою утворюються при твердненні виливків сплаву № 6 з вмістом Mn і Cr, відповідно, 3,56 % і 7,00 % (табл. 1) в залишках рідини між гілками дендритів аустеніту, що згодом частково перетворюється в результаті евтектоїдного розпаду на перліт. В сплаві № 5 системи Fe – Mn – Cr – C із меншим вмістом Cr (3,88 %) формується евтектика ледебуритного типу (рис. 2 в). Дані мікрорентгеноспектрального аналізу, проведеного за допомогою растрового електронного мікроскопа EVO-50 XVP з енергодисперсійною приставкою INKA ENERGY-450, свідчать, що в сплаві № 6 кристали карбідної фази характеризуються властивим карбиду Me_7C_3 підвищеним вмістом C і Cr (рис. 3 б, табл. 2).

На дифрактограмі цього сплаву чітко виявляються (рис. 4) системні інтерференції, що дозволяють однозначно інтерпретувати карбідну фазу в сплаві № 6, структурну складову розгалужених (на відміну від ледебуриту) колоніальних евтектик, як карбід Me_7C_3 (рис. 2 г, 3 а). Крім карбиду Me_7C_3 на дифрактограмі виявлені інтерференції другої карбідної фази – цементиту Me_3C .

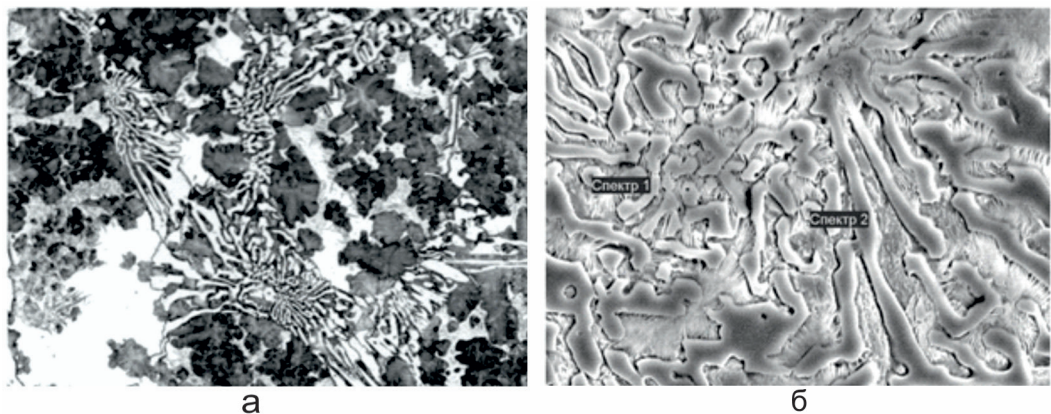


Рис. 3. Мікроструктура сплаву № 6 (а) × 800, (б) × 3000.

Fig. 3. Microstructure of alloy No. 6 (a) × 800, (b) × 3000.

Таблиця 2
Вміст елементів у карбідній фазі сплаву № 6

Table 2
Content of elements in the carbide phase of alloy No. 6

Спектр	C	Si	P	S	Ti	Cr	Mn	Fe	Разом
Спектр 1	9.86	0.16	0.00	0.04	0.01	28.17	6.35	55.41	100.00
Спектр 2	6.79	0.49	0.11	0.01	0.00	15.01	5.41	72.18	100.00

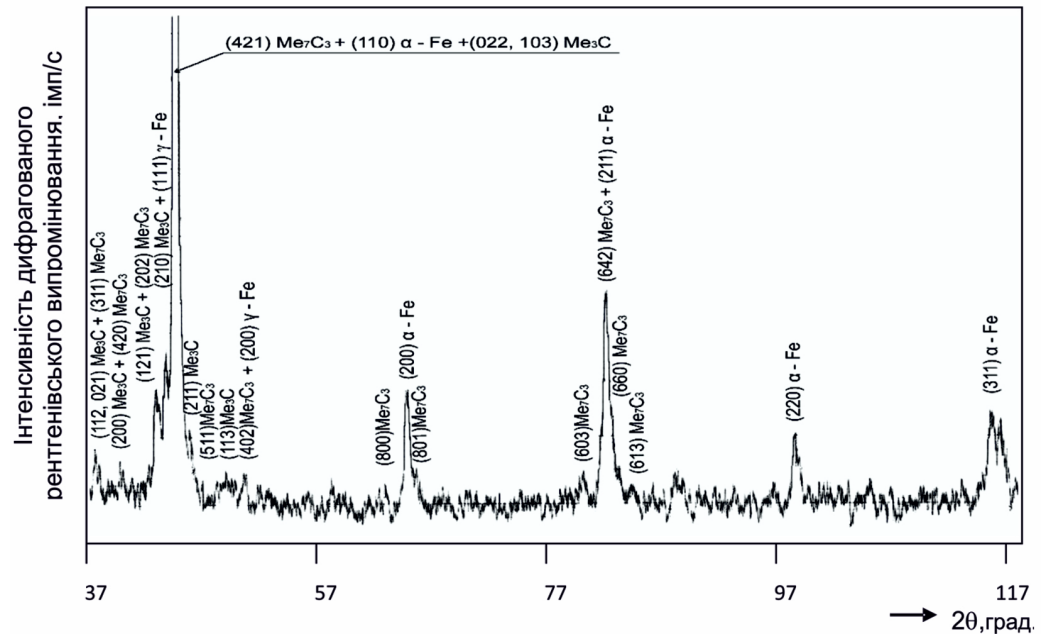


Рис. 4. Дифрактограма сплаву № 6 (монохроматизоване випромінювання Cu Kα).

Fig. 4. Diffractogram of alloy No. 6 (monochromatized Cu Kα radiation).

Отже, при такому вмісті хрому в сплаві № 6, кристалізація розплаву, що залишилась між гілками аустенітних дендритів, відбувалася за двома евтектичними реакціями $P \rightarrow \gamma\text{-Fe} + \text{Me}_7\text{C}_3$ і $P \rightarrow \gamma\text{-Fe} + \text{Me}_3\text{C}$, остання з яких здійснюється в збіднених вуглецем та легуючими елементами мікрооб'ємах рідини. Достатньо висока інтенсивність інтерференцій цементиту на дифрактограмі рис. 4 зумовлена додатковим внеском його кристалітів у перлітній складовій структурі сплаву (рис. 3 а).

Евтектичний карбід Me_7C_3 в сплаві № 6 системи $\text{Fe} - \text{C} - \text{Mn} - \text{Cr}$, на відміну від сплавів системи $\text{Fe} - \text{C} - \text{Cr}$ [1], утворюється при зниженому вмісті хрому (7,00 %, табл. 1). У цьому сплаві марганець, як ізоморфний хрому елемент, сприяє зниженню концентрації хрому, необхідної для утворення карбідів типу Me_7C_3 .

Матриця сплаву перліто-аустенітна (рис. 3 а). Наявність фериту (у нашому випадку як складової перліту) та аустеніту (у вигляді розподілених за обсягом світлих ділянок) у структурі цього сплаву (рис. 3 а) підтверджується виявленими на дифрактограмі (рис. 4) інтерференціями цих фаз.

Узагальнення результатів виконаних досліджень дозволило побудувати схематичну фазово-концентраційну діаграму структуроутворення при кристалізації сплавів системи $\text{Fe} - \text{C} - \text{Mn} - \text{Cr}$, що відображає їх поділ за областями з різними типами фазових перетворень при кристалізації $P \rightarrow \gamma\text{-Fe}$, $P \rightarrow \gamma\text{-Fe} + \text{Me}_3\text{C}$ і $P \rightarrow \gamma\text{-Fe} + \text{Me}_7\text{C}_3$, $P \rightarrow (\gamma\text{-Fe} + \text{Me}_7\text{C}_3) + (\gamma\text{-Fe} + \text{Me}_3\text{C})$ (рис. 5).

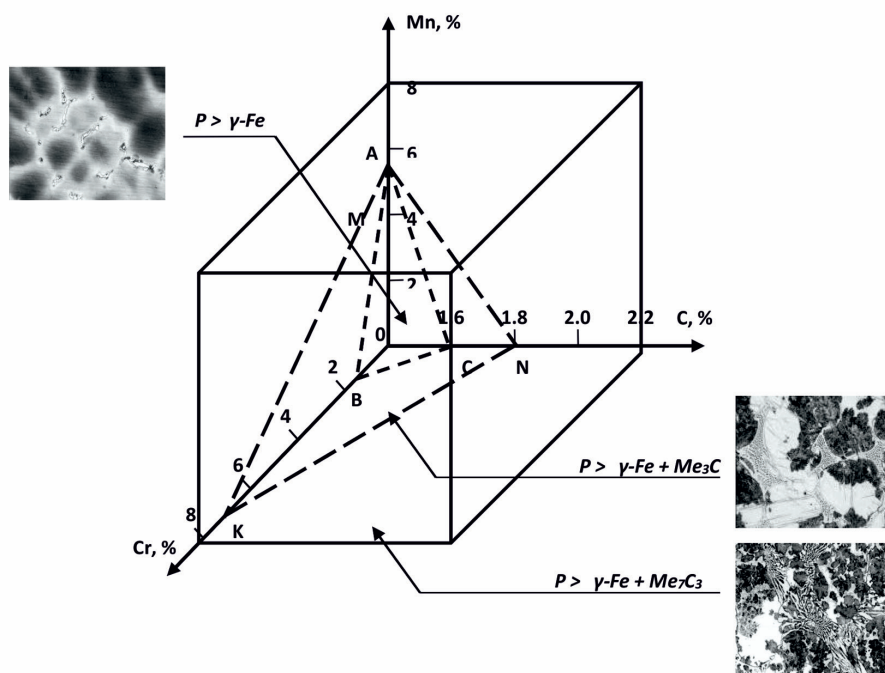


Рис. 5. Фазово-концентраційна діаграма структуроутворення при кристалізації сплавів системи $\text{Fe} - \text{C} - \text{Mn} - \text{Cr}$.

Fig. 5. Phase-concentration diagram of structure formation by crystallization of alloys of the $\text{Fe} - \text{C} - \text{Mn} - \text{Cr}$ system.

Дані табл. 1 свідчать про те, що твердість досліджених сплавів № 3-6 набагато перевищує твердість сплавів № 1, 2. Це пояснюється, власне, збільшенням кількості твердих карбідних складових (Me_3C і Me_7C_3) в структурі сплавів № 3-6.

Випробування на ударно-абразивне зношування показало, що зразки сплавів № 5 (з евтектикою ледебуритного типу) і № 6 (з евтектиками аустеніто-хромистокарбідного і ледебуритного типів) мають показники втрати відносної маси відповідно 0,202 і 0,242 %, що набагато нижче втрати маси порівняльного (еталонного) зразка із сталі Х12МФ – 0,352 %.

Таким чином, встановлено, що при кристалізації виливків із хромомарганцевих сплавів системи Fe – Mn – Cr – C при концентраціях C, Mn та Cr на рівні 2,10 %, 3,56 % та 7,00 %, відповідно, можлива реалізація евтектичного перетворення $P \rightarrow A + \text{Me}_7\text{C}_3$, тобто, утворення евтектики на основі високотвердого карбіду Me_7C_3 .

Показано, що економнолеговані хромомарганцеві залізовуглецеві сплави перехідного класу з евтектикою ледебуритного типу та з евтектиками аустеніто-хромистокарбідного та ледебуритного типів характеризуються високим рівнем ударно-абразивної зносостійкості.

Результати проведених досліджень свідчать про перспективність використання економнолегованих хромомарганцевих сплавів і можуть бути рекомендовані для подальшого дослідження й застосування як зносостійкі матеріали для виготовлення деталей змінного металургійного обладнання, що експлуатуються в важких умовах абразивного та ударно-абразивного зносу.

Література

1. Перов В. А., Андреев Е. Е., Биленко Л. Ф. Дробление, измельчение и грохочение руд. – М.: Недра. – 1990. – 301 с.
2. Большаков В. И., Вишняков В. И., Порубова Т. П., Лаврик А. И. Оценка износа деталей бесконусного загрузочного устройства // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб. научн. трудов. – 2005. – № 10. – С. 275-286.
3. Цыпин И. И. Белые износостойкие чугуны, структура и свойства. – М.: Металлургия. – 1983. – 175 с.
4. Бобырь С. В., Нестеренко А. М., Репина Н. И. Формирование эвтектической карбидной фазы в износостойких марганцовистых чугунах // Теория и практика металлургии. – 2006. – №4-5. – С. 96-98.
5. Чейлях А. П., Олейник И. М. Влияние отпуска на структуру и свойства хромомарганцовистых и марганцовистых износостойких чугунов с метастабильным аустенитом // Вестник ПГТУ. – 2003. – №13. – С. 103-108.
6. Куцова В. З., Нестеренко А. М., Куцов А. Ю., Ковзель М. А. Фазовый состав и свойства высокоуглеродистых чугунов // Перспективні задачі інженерної науки. – 2002. – № 4. – С. 322-335.
7. Андрущенко М. И., Куликовский Р. А., Брыков М. Н. Сравнительный анализ способности к упрочнению и износостойкости в условиях абразивного изнашивания сталей системы Fe – C – Cr в зависимости от способов управления структурным состоянием // Металл и литье Украины. – 2006. – № 6. – С. 42-46.

8. Сильман Г. И., Памфилов Е. А., Грядунцов С. С., Грувман А. И. Влияние структуры белых хромованадиевых чугунов на их износостойкость // *МиТОМ*. – 2007. – № 8. – С. 32-36.
9. Петраков О. В., Поддубный А. Н. Структура белых износостойких легированных чугунов // *МиТОМ*. – 2007. – №8. – С. 36-38.
10. Гарбер М. Е. Отливки из белых износостойких чугунов. – М.: Машиностроение. – 1972. – 112 с.
11. Таран Ю. Н., Мазур В. И. Структура эвтектических сплавов. – М.: Металлургия. – 1978. – 312 с.

References

1. Perov V. A., Andreev E. E., Bilenko L. F. *Drobleniye, izmel'cheniye i grokhocheniye rud* (Crushing, grinding and screening of ores), M.: Nedra, 1990, 301 p. [in Russian].
2. Bolshakov V. I., Vishnyakov V. I., Porubova T. P., Lavrik A. I., *Fundamental'nyye i prikladnyye problemy chernoy metallurgii*. Sb. nauch. Trudov, Issue. 10, 2005, pp. 275-286. [in Russian].
3. Tsypin I. I. *Belyye iznosostoykiye chuguny, struktura i svoystva* (White wear-resistant cast irons, structure and properties), M.: Metallurgia, 1983, 175 p. [in Russian].
4. Bobyr S. V., Nesterenko A. M., Repina N. I., *Teoriya i praktika metallurgii*, No. 4-5, 2006, pp. 96-98 [in Russian].
5. Cheylyakh A. P., Oleinik I. M. *Vestnik PGTU*, No. 13, 2003, pp. 103-108 [in Russian].
6. Kutsova V. Z., Nesterenko A. M., Kutsov A. Yu., Kovzel M. A., *Perspektivni zadachi inzhenernoi nauki*, 2002, Issue. 4, pp. 322-335 [in Russian].
7. Andrushchenko M. I., Kulikovskiy R. A., Brykov M. N. *Metall i lit'ye Ukrainy*, No. 6, 2006, pp. 42-46 [in Russian].
8. Silman G. I., Pamfilov E. A., Gryadunov S. S., Grouvman A. I., *MiTOM*, No. 8, 2007, pp. 32-36 [in Russian].
9. Petrakov O. V., Poddubny A. N., *MiTOM*, No. 8, 2007, pp. 36-38 [in Russian].
10. Garber M. E. Castings from white wear-resistant cast irons. M.: Mashinostroenie, 1972, 112 p. [in Russian].
11. Taran Yu. N., Mazur V. I. *Struktura evtekticheskikh spлавov* (Structure of eutectic alloys), M.: Metallurgy, 1978, 312 p. [in Russian].

Одержано 14.04.23

V. L. Pliuta, A. M. Nesterenko

Features of structure formation in economy alloyed chromo-manganese iron-carbon alloys for metallurgical equipment parts

Summary

It was established that in cast chromium-manganese alloys of the transition class Fe – C – Mn – Cr system (carbon content no more than 2.2 %) with a certain combination of Mn and Cr, the formation of crystals of highly hard carbide Me_7C_3

is possible. The relationship between the phase-concentration parameters and the structure formation of alloys of the Fe – C– Mn – Cr system was studied, the analysis of the relationship between the phase-concentration parameters, structure formation and properties was carried out on the compositions of the Fe – C– Mn and Fe – C– Mn – Cr with 1.5-2.1 % C, with a variable content of Mn, Cr and additives of other alloying elements – Si and Ni at the level of impurities. A phase-concentration diagram of the crystallization of the alloys of this system was constructed, delimiting the regions of crystallization $P \rightarrow \gamma\text{-Fe}$, $P \rightarrow \gamma\text{-Fe} + \text{Me}_3\text{C}$ and $P \rightarrow (\gamma\text{-Fe} + \text{Me}_7\text{C}_3) + (\gamma\text{-Fe} + \text{Me}_3\text{C})$. It is shown that economically alloyed chromium-manganese alloys of the Fe – Mn – Cr – C system with eutectics based on Me_7C_3 carbide are characterized by a high level of shock-abrasive wear resistance, and the results of the conducted studies indicate the prospects of using economically alloyed chromium-manganese alloys and can be recommended for further research and use as wear-resistant materials for the manufacture of parts of replaceable metallurgical equipment, which are operated in severe conditions of abrasive and shock-abrasive wear.

Keywords: phase-concentration diagram, microstructure, Me_7C_3 carbide, impact-abrasive wear resistance, chromium-manganese alloys.

Журнал **МОН** внесено до Переліку наукових фахових видань України згідно з наказом Міністерства освіти і науки України №409 від 17.03.2020.

Повна назва журналу

**"Науково-технічний журнал
"Металознавство та обробка металів"**

Вартість одного номера журналу - 150 грн.

Перед оплатою необхідно узгодити потрібну кількість номерів з редакцією.

Оплата здійснюється на розрахунковий рахунок Фізико-технологічного інституту металів та сплавів НАН України.

Доступні архівні номери журналу з 1995 р. по 2022 р. включно.

**Розрахунковий рахунок для замовників,
спонсорів і рекламодавців:**

р/р UA828201720313251001201012215,
банк ДКСУ в м. Києві код банку 820172

Отримувач - ФТІМС НАН України, код ЄДРПОУ 05417153,
з посиланням на журнал "МОН"

Копію документа оплати та відомості про отримувача
просимо надсилати до редакції,
вказавши номер і дату платіжного документа.