

УДК 669.017.03

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ВЫДЕРЖКИ НА ЛИКВАЦИЮ И МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ХРОМОМАНГАНЦЕВОГО ЧУГУНА

КУЦОВА В.З.^{1*}, д. т. н., проф.,
КОВЗЕЛЬ М.А.^{2*}, к. т. н., доц.,
ШВЕЦ П.Ю.^{3*}, асп.,
ГРЕБЕНЕВА А.В.^{4*}, к. т. н., асс.,
РАТНИКОВА И.В.^{5*} с.н.с.

^{1*} Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, г. Днепр, Украина, 49005, тел. 0562 47-42-49, e-mail: root@lks.dp.ua ORCID ID: 0000-0003-2413-679X

^{2*} Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, г. Днепр, Украина, 49005, тел. 0562 47-42-49, e-mail: root@lks.dp.ua ORCID ID: 0000-0001-5720-1186

^{3*} Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, г. Днепр, Украина, 49005, тел. +38068 056 73 22, e-mail: pavel22shvets@yandex.com ORCID ID: 0000-0003-0267-6330

^{4*} Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, г. Днепр, Украина, 49005, тел. 0562 47-42-49, e-mail: root@lks.dp.ua ORCID ID: 0000-0003-3594-9497

^{5*} Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, г. Днепр, Украина, 49005, тел. 0562 47-42-49, e-mail: root@lks.dp.ua ORCID ID: 0000-0001-7939-4740

Аннотация. *Цель.* Исследование влияния легирующих элементов и их перераспределения между фазами и структурными составляющими в зависимости от температуры изотермических выдержек в хромоманганцевом чугуна на микромеханические характеристики с целью прогнозирования износостойкости в процессе эксплуатации. *Методика.* Объектом исследования в настоящей работе служили образцы опытно-промышленных плавок хромоманганцевого чугуна. Чугун подвергали аустенитизации при 950°C в течение 1 часа с последующими изотермическими выдержками при температурах 550°C, 500°C, 400°C, 350°C, 300°C, 250°C, 200°C, 150°C в течение 24 - 40 часов. Распределение легирующих элементов между фазами и структурными составляющими хромоманганцевого чугуна в литом состоянии и после изотермических выдержек изучали с помощью электронного микроскопа JSM-840 с системой микроанализа "Link-860/500". Идентификацию фаз в исследованных чугунах проводили методом рентгеноструктурного анализа на дифрактометре ДРОН - 3М в FeK α - излучении. Твердость хромоманганцевых чугунов в литом состоянии и после изотермических выдержек определяли методом Роквелла. *Результаты.* Проведенный комплекс исследований показал, что фазовые, структурные превращения и ликвационные процессы, развивающиеся в хромоманганцевом чугуна при изотермических выдержках в интервале температур от 200 до 550°C, приводят к увеличению микротвердости и микромеханических характеристик матрицы, а микромеханические характеристики карбидов снижаются по сравнению с литым состоянием. *Научная новизна.* Установлено, что уровень твердости хромоманганцевого чугуна в литом состоянии и после изотермических выдержек определяется как степень легированности матрицы, так и степень легированности хромом эвтектического карбида и обусловлен фазовыми превращениями переохлажденного аустенита. *Практическая значимость.* Понимание механизмов фазовых превращений и структурных изменений, связанных с ликвационными процессами, и получение количественных закономерностей, описывающих формирование структурных составляющих при изотермических выдержках, позволит управлять структурой и свойствами, а также прогнозировать износостойкость изделий из хромоманганцевых чугунов.

Ключевые слова: хромоманганцевый чугун, структура, фазовый состав, свойства, степень ликвации.

ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ ІЗОТЕРМІЧНОЇ ВИТРИМКИ НА ЛІКВАЦІЮ ТА МІКРОМЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ХРОМОМАНГАНЦЕВОГО ЧАВУНУ

КУЦОВА В.З.^{1*}, д. т. н., проф.,
КОВЗЕЛЬ М.А.^{2*}, к. т. н., доц.,
ШВЕЦ П.Ю.^{3*}, асп.,
ГРЕБЕНЕВА А.В.^{4*}, к. т. н., асс.,
РАТНИКОВА І.В.^{5*} с.н.с.

^{1*} Кафедра матеріалознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, м. Дніпро, Україна, 49005, тел. 0562 47-42-49, e-mail: root@lks.dp.ua ORCID ID: 0000-0003-2413-679X

2* Кафедра матеріалознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, м. Дніпро, Україна, 49005, тел. 0562 47-42-49, e-mail: root@lks.dp.ua ORCID ID: 0000-0001-5720-1186

3* Кафедра матеріалознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, м. Дніпро, Україна, 49005, тел. +38068 056 73 22, e-mail: pavel22shvets@yandex.com ORCID ID: 0000-0003-0267-6330

4* Кафедра матеріалознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, м. Дніпро, Україна, 49005, тел. 0562 47-42-49, e-mail: root@lks.dp.ua ORCID ID: 0000-0003-3594-9497

5* Кафедра матеріалознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, м. Дніпро, Україна, 49005, тел. 0562 47-42-49, e-mail: root@lks.dp.ua ORCID ID: 0000-0001-7939-4740

Анотація. Мета. Дослідження впливу легуючих елементів та їх перерозподілу між фазами і структурними складовими залежно від температури ізотермічних витримок в хромомарганцевому чавуні на мікромеханічні характеристики з метою прогнозування зносостійкості в процесі експлуатації. **Методика.** Об'єктом дослідження в даній роботі служили зразки дослідно-промислових плавок хромомарганцевого чавуну. Чавун піддавали аустенізації при 950°C протягом 1 години з подальшими ізотермічними витримками при температурах 550°C, 500°C, 400°C, 350°C, 300°C, 250°C, 200°C, 150°C протягом 24 – 40 годин. Розподіл легуючих елементів між фазами та структурними складовими хромомарганцевого чавуну у литому стані та після ізотермічних витримок вивчали за допомогою електронного мікроскопу JSM-840 з системою мікроаналізу “Link- 860/500”. Ідентифікацію фаз в дослідних чавунах проводили методом рентгеноструктурного аналізу на дифрактометрі ДРОН - 3М в FeK α - випромінюванні. Твердість хромомарганцевих чавунів у литому стані та після ізотермічних витримок визначали методом Роквела. **Результати.** Проведений комплекс досліджень показав, що фазові, структурні перетворення та ліквідаційні процеси, що розвиваються в хромомарганцевому чавуні при ізотермічних витримках в інтервалі температур від 200 до 550°C, призводять до збільшення мікротвердості і мікромеханічних характеристик матриці, а мікромеханічні характеристики карбідів знижуються в порівнянні з литим станом. **Наукова новизна.** Встановлено, що рівень твердості хромомарганцевого чавуну у литому стані та після ізотермічних витримок визначається як ступенем легуваності матриці, так і ступенем легуваності хромом евтектичного карбїду і обумовлений фазовими перетвореннями переохолодженого аустенїту. **Практична значимість.** Розуміння механїзмів фазових перетворень та структурних змін, пов'язаних з ліквідаційними процесами, і отримання кількісних закономірностей, що описують формування структурних складових при ізотермічних витримках, дозволить управляти структурою і властивостями, а також прогнозувати зносостійкість виробів з хромомарганцевих чавунів.

Ключові слова: хромомарганцевий чавун, структура, фазовий склад, властивості, ступінь ліквідації.

INFLUENCE OF ISOTHERMAL SOAKING TEMPERATURE ON THE SEGREGATION AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF CHROMOMAGNETIC CAST IRON

KUTZOVA V.Z.^{1*}, *Doct. Sc. (Tech.), Prof.*,
KOVZEL M.A.^{2*}, *Cand. Sc. (Tech.), Ass. Prof.*,
SHVETS P.U.^{3*}, *PhD student*,
GREBENEVA A.V.^{4*}, *Cand. Sc. (Tech.), Ass.*,
RATNICOVA I.V.^{5*}, *S.R.F.*

^{1*} Department of Material Science, National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarin, 4 ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. 0562 47-42-49, e-mail: root@lks.dp.ua ORCID ID: 0000-0003-2413-679X

^{2*} Department of Material Science, National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarin, 4 ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. 0562 47-42-49, e-mail: root@lks.dp.ua ORCID ID: 0000-0001-5720-1186

^{3*} Department of Material Science, National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarin, 4 ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38068 056 73 22, e-mail: pavel22shvets@yandex.com ORCID ID: 0000-0003-0267-6330

^{4*} Department of Material Science, National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarin, 4 ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. 0562 47-42-49, e-mail: root@lks.dp.ua ORCID ID: 0000-0003-3594-9497

^{5*} Department of Material Science, National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarin, 4 ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. 0562 47-42-49, e-mail: root@lks.dp.ua ORCID ID: 0000-0001-7939-4740

Annotation. Purpose. Influence of alloying elements and their redistribution between phases and structural components, depending of isothermal soaking temperature in chromomagnetic cast iron on micromechanical characteristics for the prediction of wear resistance in service. **Methodology.** The object of investigation in this work were the samples of experimental-industrial melting chromomagnetic cast iron. Cast iron was subjected to austenitization at 950°C for 1 hour with further isothermal soaking at 550°C, 500°C, 400°C, 350°C, 300°C, 250°C, 200°C, 150°C for 24 - 40hrs temperatures. The distribution of alloying elements between phases and structural components of chromomagnetic cast iron in the cast state and after isothermal soaking were studied by means of electron microscope JSM-840 with the system of microanalysis “Link - 860/500”. Identification phases in the investigated cast irons were carried out by x-ray analysis on the diffractometer DRON - 3M in FeK α radiation. Chromomagnetic hardness of cast irons in the cast state and after isothermal soaking were determined by the Rockwell method. **Findings.** Complex of investigations showed that the phase, structural transformations and phase separation processes, developing in chromomagnetic cast iron during isothermal soaking in the temperature range from 200 to 550°C, increase the microhardness and mechanical characteristics of the matrix,

micromechanical characteristics of the carbides are reduced in comparison with cast state. **Originality.** It was established that the level of hardness of chromomagnetic cast iron in the cast state and after isothermal soaking is defined as the degree of alloying matrix and degree of alloying eutectic chromium carbide and due to the phase transformations of supercooled austenite. **Practical value.** Understanding of the phase transformations mechanisms and structural changes associated with phase separation processes, and obtaining quantitative regularities describing the formation of structural components when insulated shutter speeds will allow you to control the structure and properties, and to predict the durability of chromomagnetic cast irons products.

Keywords: chromomagnetic cast iron, structure, phase composition, properties, degree of segregation.

Введение

Многие детали оборудования горнодобывающей и металлургической промышленности работают в условиях абразивного, ударно-абразивного износа, сил трения и агрессивных коррозионных сред. Проблема повышения качества материалов для деталей работающих в условиях трения при снижении затрат на их производство, является весьма важной и актуальной. Современные исследования свидетельствуют о том, что перспективными материалами для работы в таких условиях, имеющими высокий комплекс свойств при низкой себестоимости, являются хромомарганцевые чугуны [1, 2].

Хром является основным легирующим элементом износостойких чугунов. Содержание хрома в металлической основе определяет износостойкость и коррозионные свойства этих сплавов. Основное влияние на содержание хрома в металлической основе оказывает углерод. В зависимости от содержания хрома и углерода в белых чугунах образуются карбиды $(Cr, Fe)_3C$, $(Cr, Fe)_7C_3$ и $(Cr, Fe)_{23}C_6$. Содержание в металлической основе более 12% хрома делает ее коррозионноустойчивой в атмосфере и некоторых промышленных средах. В системе Fe-C-Cr повышение содержания хрома приводит к снижению растворимости углерода в аустените. При введении в сплав 25% хрома растворимость углерода в аустените снижается до 0,4% [3, 4]. Для обеспечения коррозионной стойкости сплавов с аустенитной металлической основой необходимо легирование элементами (Mn, Ni), расширяющими область существования γ - железа, и соответственно, повышающими растворимость в нем хрома. Марганец, обладая большим сродством к углероду, замещает железо в цементите и карбидах хрома, при этом образуются карбиды хрома, легированные железом и марганцем [5-7]. Никель повышает вязкость разрушения и является незаменимым компонентом материалов, работающих в условиях ударных нагрузок. Содержание никеля ограничивают в связи с его высокой стоимостью, несмотря на положительное влияние на износостойкие и коррозионноустойчивые свойства чугунов. Никель с одной стороны является

аустенитообразующим элементом, с другой стороны снижает растворимость углерода в аустените, что приводит к увеличению количества карбидов хрома и, соответственно, к снижению содержания хрома в твердом растворе. Совместное легирование белых чугунов хромом, марганцем, никелем и другими элементами обеспечивает необходимые эксплуатационные свойства.

Известно так же, что свойства чугунных изделий, работающих в условиях интенсивного абразивного, ударно-абразивного износа, сил трения и агрессивных коррозионных сред, могут быть существенно улучшены за счет термической обработки. Для разработки режимов термического упрочнения, повышающих срок службы изделий, необходимо тщательное исследование закономерностей формирования структуры, фазового состава, кинетики распада переохлажденного аустенита в перлитной и промежуточной области температур, а также ликвационных процессов, развивающихся в хромомарганцевых чугунах при термической обработке.

Однако в современной литературе особенности фазовых превращений аустенита в хромомарганцевых чугунах и влияние легирующих элементов на кинетику распада переохлажденного аустенита представлены крайне ограничено. В литературе также практически отсутствует информация о взаимосвязи структуры, фазового состава и ликвационных процессов с механическими и микромеханическими характеристиками хромомарганцевых чугунов.

Поэтому исследование влияния легирующих элементов и их перераспределения между фазами и структурными составляющими в зависимости от температуры изотермических выдержек в хромомарганцевом чугуне на твердость и микромеханические характеристики с целью прогнозирования износостойкости в процессе эксплуатации является актуальной задачей современного материаловедения.

Материал и методика исследования. Объектом исследования в настоящей работе служили образцы опытно-промышленных плавок хромомарганцевого чугуна, химический состав которого приведен в таблице 1.

Таблица 1

Химический состав исследуемого чугуна / *Chemical composition of researched cast iron*

Содержание легирующих элементов, %									
C	Cr	Ni	V	Mn	Si	Cu	S	P	Fe
2,7	15,91	0,95	0,25	10,5	0,9	0,9	0,009	0,027	67,9

Чугун подвергали аустенитизации при 950°C в течение 1 часа с последующими изотермическими выдержками при температурах 550°C, 500°C, 400°C, 350°C, 300°C, 250°C, 200°C, 150°C в течение 24 - 40 часов.

Распределение легирующих элементов между фазами и структурными составляющими хромомарганцевого чугуна в литом состоянии и после изотермических выдержек изучали с помощью электронного микроскопа JSM-840 с системой микроанализа "Link - 860/500" (фирма "Link Analytical", Англия). Исследования проводили в режиме вторичных (SEI) и обратнорассеянных электронов (BEI). Ток пучка составлял $I = 10^{-7} \dots 10^{-9}$ А. Напряжение $U = 20$ кВ. Время анализа составляло $t = 100$ сек. Диаметр пучка составлял 1...1,5 мкм. Анализ проводили с помощью программы ZAF4/FLS. В качестве эталонов были выбраны чистые образцы по каждому исследованному элементу (чистота составляла 99,99 %). Использовали стандартные эталоны фирмы "Link Analytical".

Идентификацию фаз в исследованных чугунах проводили методом рентгеноструктурного анализа на дифрактометре ДРОН - 3М в FeK_{α} - излучении. Твердость хромомарганцевых чугунов в литом состоянии и после изотермических выдержек определяли методом Роквелла.

Механические свойства карбидов, продуктов распада аустенита и трещиностойкость оценивали по их микротвердости (μ), микрохрупкости (γ) и хрупкой микропрочности (σ) [8, 9]. Указанные характеристики изучали в зависимости от глубины проникновения индентора в материал, что позволило сравнить по данным характеристикам механические свойства одинаковых по толщине поверхностных слоев материала.

Микрохрупкость γ – соотношение площадей, в которых происходит хрупкое разрушение в районе отпечатка и площади самого отпечатка. Микрохрупкость γ продуктов распада аустенита и карбида Me_7C_3 определяли по формуле (1):

$$\gamma_{вд} = \frac{D^2 - d^2}{d^2}, \quad (1)$$

где D – средний размер поврежденной зоны, мкм;
 d – диагональ отпечатка, мкм.

Хрупкая микропрочность – напряжения, которые необходимы для образования единицы площади хрупкого разрушения в районе отпечатка пирамиды. Хрупкую микропрочность $\sigma_{вд}$ продуктов распада аустенита и карбида Me_7C_3 определяли по формуле (2):

$$\sigma_{вд} = \frac{P}{D^2} \text{ кгс/мм}^2, \quad (2)$$

где P – нагрузка на индентер, г;
 D – средний размер поврежденной зоны, мкм.

Трещиностойкость k_{1c} продуктов распада аустенита и карбида Me_7C_3 определяли по формуле (3):

$$k_{1c} = 0,203a^2 \cdot H_v \cdot C^{-3/2}, \quad (3)$$

где a – полудиагональ отпечатка индентора, мкм;

H_v – твердость материала, МПа;

C – длина радиальной трещины, мкм.

Твердость при индентировании пирамидой Виккерса поверхности исследованного материала определяли исходя из следующей зависимости:

$$H_v = 463,6 \cdot F \cdot a^{-2}, \quad (4)$$

где F – нагрузка, которая действует на индентер, г.

Результаты исследования. Распределение легирующих элементов между фазами и структурными составляющими в хромомарганцевом чугуна в литом состоянии и после изотермических выдержек изучали с помощью локального рентгеноспектрального анализа. Количественный локальный рентгеноспектральный анализ производили по точкам. Анализировали содержание легирующих элементов в продуктах распада аустенита, остаточном аустените и эвтектическом карбиде.

Анализ полученных данных по распределению легирующих элементов между фазами и структурными составляющими в хромомарганцевом чугуна свидетельствует о том, что в литом состоянии (рис.1) складывается следующая ликвационная картина [10]:

- никель по сечению дендритов аустенита ликвирует существенно. Максимальное количество никеля зафиксировано на периферии дендритных ветвей, в эвтектическом карбиде никель растворяется в небольших количествах;

- ванадий – ликвирует существенно, формируя обратную ликвацию. Степень ликвации (ΔC) ванадия составляет 3,27, наблюдается растворимость ванадия в эвтектическом карбиде;

- максимальное количество марганца зафиксировано в центральных участках дендритных ветвей и в остаточном аустените. Также максимальное количество марганца зафиксировано в эвтектическом карбиде и составляет 11,06%;

- кремний, как и никель по сечению дендритов аустенита ликвирует существенно, несколько обогащает периферию дендритных ветвей аустенита, в эвтектических карбидах в небольших количествах (0, 04%);

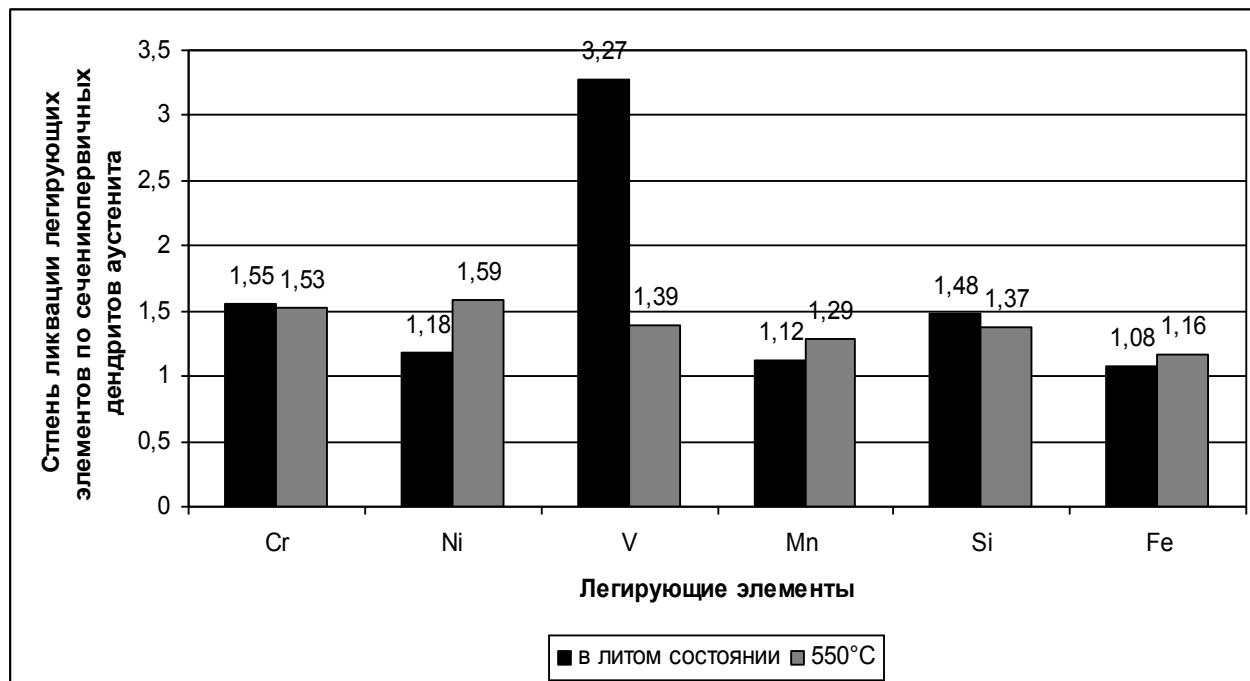
- хром – ликвирует значительно. Степень ликвации хрома составляет 1,55. В больших количествах (~ 56%) хром присутствует в эвтектическом карбиде. Сумма легирующих элементов в эвтектическом карбиде составляет 20,88%, максимальной степенью ликвации в аустените характеризуются ванадий, хром и кремний.

Аустенитизация с последующей изотермической выдержкой хромомарганцевого чугуна при температуре 550°C (рис. 1 а) практически не меняет характер распределения хрома в матрице. Степень ликвации хрома в матрице (ΔC) меняется незначительно и составляет 1,53 по сравнению с 1,55 в литом состоянии. Матрица хромомарганцевого чугуна содержит 77,81% Fe и 32,81% Cr. Эвтектический карбид - $\approx 56,18\%$ Cr и 32,81 % Fe. В

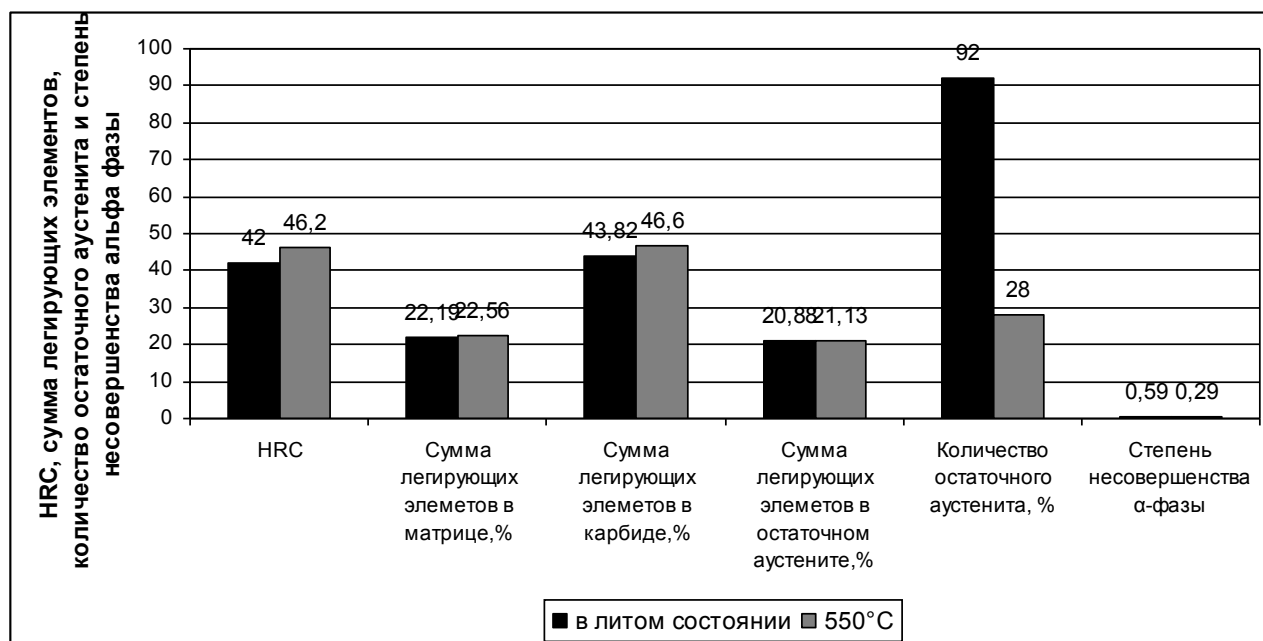
тоже время степень ликвации ванадия уменьшается почти в 2,5 раза. Изотермическая выдержка при 550°C также практически не влияет на характер ликвации никеля, марганца, кремния и железа в матрице чугуна.

По сравнению с литым состоянием сумма

легирующих элементов растворенных в матрице и остаточном аустените практически не меняется, в эвтектическом карбиде (рис. 1 б) увеличивается, степень не совершенства α - фазы ($\beta_{0,5}$) - уменьшается, количество остаточного аустенита уменьшается почти в 3 раза и составляет 28%.



а



б

Рис. 1. Степень ликвации легирующих элементов по сечению первичных дендритов аустенита (а); твердость, сумма легирующих элементов растворенных в матрице, эвтектическом карбиде и остаточном аустените, количество остаточного аустенита и степень несовершенства α - фазы (б) в хромомарганцевом чугуне в литом состоянии и после изотермической выдержки при температуре 550°C / Segregation degree of alloying elements in the cross section primary dendrites of austenite (a); hardness, the amount of alloying elements dissolved in the matrix, eutectic carbide and residual austenite, residual austenite and the degree of the α - phase imperfection (б) in chromomagnetic cast iron in the cast state and after isothermal soaking at the temperature 550°C

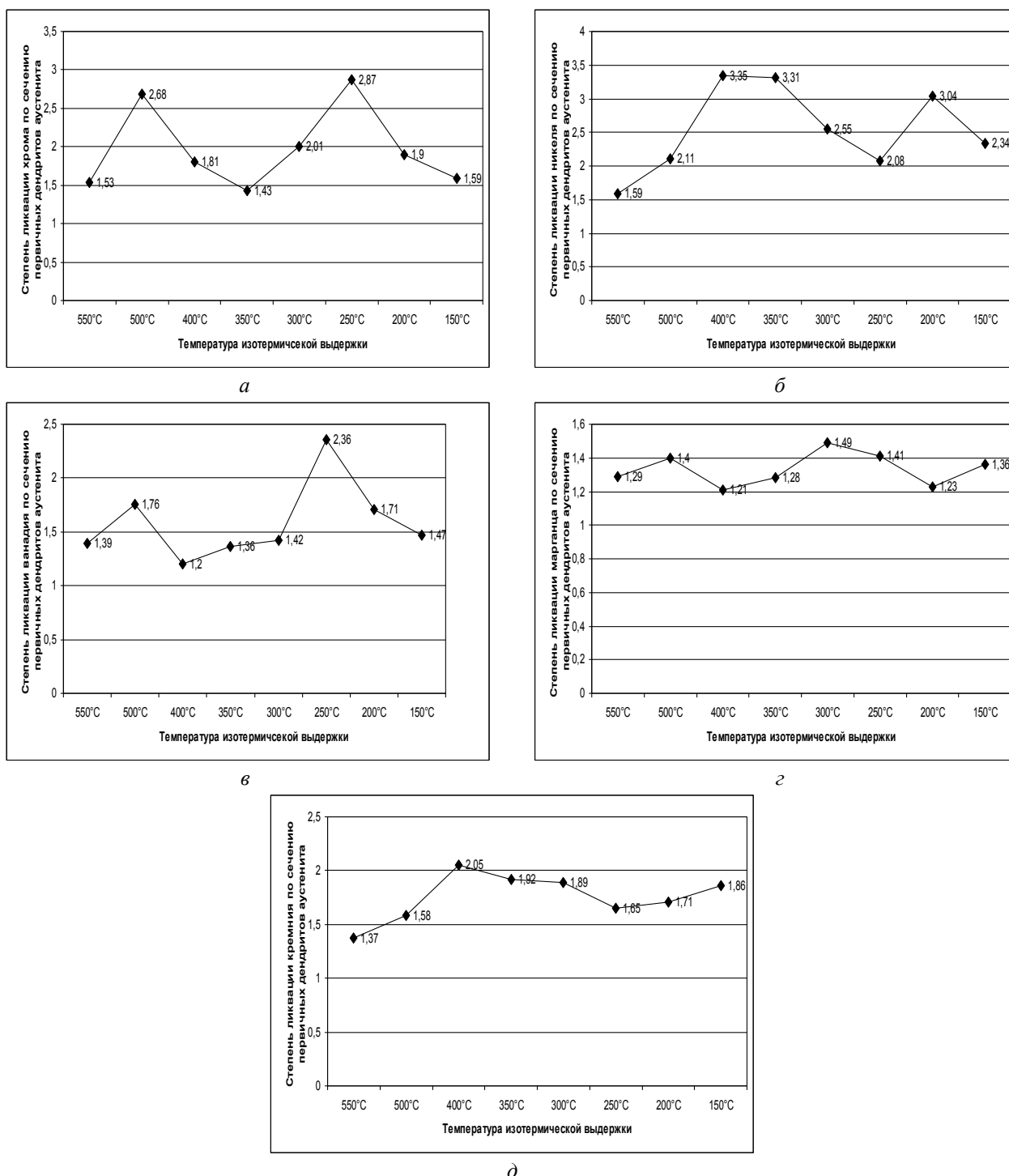


Рис. 2. Изменение степени ликвации легирующих элементов по сечению первичных дендритов аустенита в хромомарганцевом чугуна в зависимости от температуры изотермической выдержки: а - хрома; б - никеля; в - ванадия; г - марганца; д – кремния / Change in the degree of alloying elements segregation in the cross section primary dendrites of austenite in chromomagnetic cast iron depending of isothermal soaking temperature: a - chromium; b - nickel; в - vanadium; г - manganese; д – silicon

В целом эти изменения в структуре и перераспределение легирующих элементов приводят к повышению твердости с 42 HRC (в литом состоянии) до 46,7 HRC (после изотермической выдержки). Снижение температуры изотермической выдержки от 550°C до 150°C приводит к перераспределению легирующих элементов между

фазами и структурными составляющими и изменению степени ликвации по сечению первичных дендритов аустенита (рис. 2).

Снижение температуры изотермической выдержки от 500°C до 150°C приводит к:

- (500°C) - повышению степени ликвации (ΔC) хрома, никеля, ванадия, марганца, кремния и железа;

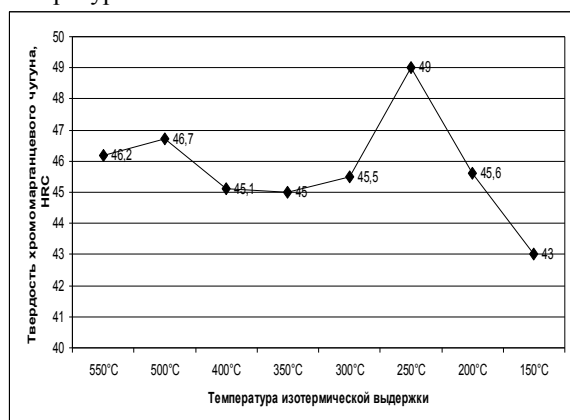
- (400°C) - уменьшению степени ликвации (ΔC) хрома, ванадия, марганца, железа и увеличению степени ликвации никеля и кремния;
- (350°C) - увеличению (ΔC) ванадия, марганца, железа и снижению (ΔC) хрома, никеля и кремния;
- (250°C) - (ΔC) хрома и ванадия повышается, а (ΔC) никеля, марганца, кремния и железа снижается;
- (200°C) - (ΔC) хрома, ванадия, марганца, железа снижается; (ΔC) никеля и кремния повышается.
- (150°C) - уменьшению степени ликвации (ΔC) хрома, никеля, ванадия и увеличению степени ликвации марганца, кремния и железа.

Изотермические выдержки в интервале 550°C - 150°C приводят к формированию более равномерного распределения кремния и марганца по сечению первичных дендритов аустенита (рис. 2 г, д). Степень ликвации кремния возрастает от 1,37 (550°C) до 2,05 (400°C) и 1,86 (150°C). Степень ликвации марганца меняется незначительно от 1,29 (550°C) до 1,36 (150°C).

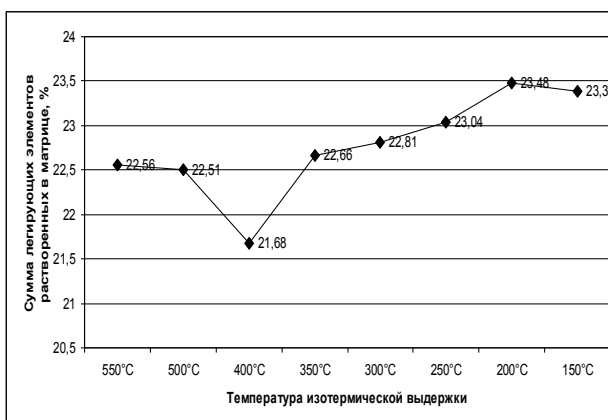
В тоже время температурные зависимости степени ликвации (ΔC) хрома, ванадия, никеля (рис. 2 а, б, в) демонстрируют резкое скачкообразное изменение параметра ΔC при температурах 500°C, 250°C и достаточно плавное изменение в интервале температур 400°C - 300°C. Выявленные

температурные интервалы изменения характера ликвации хрома, ванадия и никеля хорошо коррелируют с температурами фазовых превращений переохлажденного аустенита в исследуемом чугуне (перлитное, бейнитное, мартенситное) [11] и обусловлены механизмами реализуемых фазовых превращений.

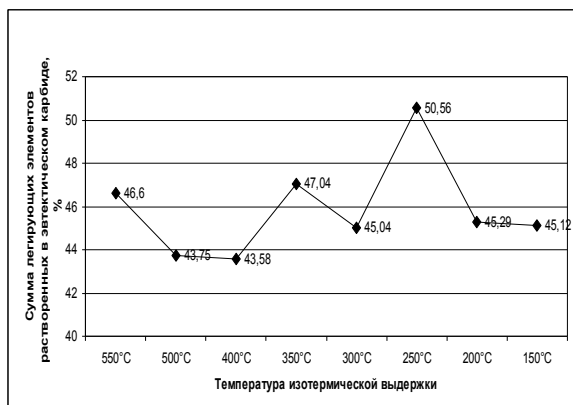
Наряду с ликвационными картинками, формирующимися по сечению первичных дендритов аустенита, изменение температуры изотермической выдержки приводит к немонотонному изменению суммы легирующих элементов в матрице, эвтектическом карбиде, остаточном аустените, количества остаточного аустенита и, соответственно, количества хромомарганцевого чугуна (рис. 3). Скачкообразное увеличение твердости (рис. 3 а) в интервале температур 550 - 400°C и 300 - 200°C удовлетворительно коррелирует с температурными интервалами изменения суммы легирующих элементов в матрице, эвтектическом карбиде и остаточном аустените (рис. 3 б, в, г), а также с температурными интервалами фазовых превращений переохлажденного аустенита в исследуемом чугуне [11], выявленных при дилатометрических исследованиях кинетики превращений.



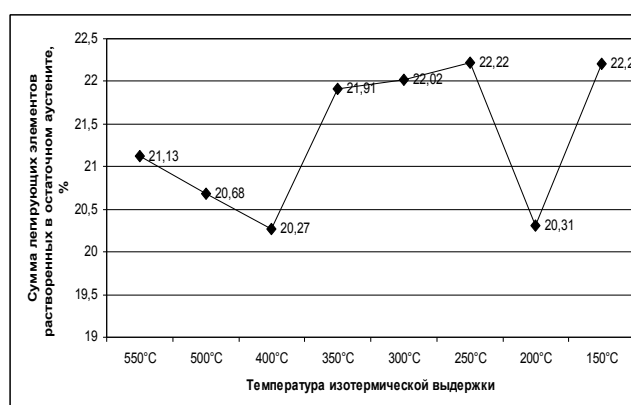
а



б



в



г

Рис. 3. Изменение твердости (а), суммы легирующих элементов растворенных в матрице (б), эвтектическом карбиде (в) и остаточном аустените (г) в хромомарганцевом чугуне после изотермической выдержки / Hardness change (a), amount of alloying elements dissolved in the matrix (b), eutectic carbide (b) and residual austenite (g) in chromomagnetic cast iron after isothermal soaking

Таким образом, анализ полученных данных по распределению легирующих элементов между фазами и структурными составляющими в хромомарганцевом чугуна позволяет сделать вывод, что уровень твердости чугуна в литом состоянии и после изотермических выдержек определяется как степень легированности матрицы, особенно, кремнием и марганцем, так и степенью легированности хромом эвтектического карбида, а также суммой легирующих элементов в остаточном аустените и обусловлен фазовыми превращениями,

реализующимися при охлаждении в твердом состоянии.

Фазовые превращения, структурные изменения и ликвационные процессы в хромомарганцевом чугуна при изотермических выдержках, приводят к изменению микромеханических характеристик структурных составляющих (матрицы и эвтектических карбидов).

В таблицах 2, 3 приведены микромеханические характеристики матрицы и карбидов в хромомарганцевом чугуна в литом состоянии и после изотермических выдержек.

Таблица 2

Микромеханические характеристики матрицы в хромомарганцевом чугуна в литом состоянии и после изотермических выдержек / *Micromechanical characteristics of the matrix in chromomagnetic cast iron in the cast state and after isothermal soaking*

№ п/п	Состояние исследуемых образцов	Микротвердость матрицы, МПа	Микрохрупкость матрицы, γ отн. ед.	Хрупкая микропрочность матрицы, $\sigma_{вд}$	Трещиностойкость матрицы, k_{1c}
1	В литом состоянии	3668	0,9	0,7	6,3
2	Изотермическая выдержка при 550°C	4664	1,16	0,9	7,1
3	Изотермическая выдержка при 500°C	4664	1,16	0,9	7,1
4	Изотермическая выдержка при 400°C	5088	1,25	1,1	8,7
5	Изотермическая выдержка при 350°C	5088	1,25	1,1	8,7
6	Изотермическая выдержка при 300°C	4471	1,1	0,93	7,9
7	Изотермическая выдержка при 250°C	4291	1,07	0,88	7,4
8	Изотермическая выдержка при 200°C	4869	1,2	1,0	7,5

Таблица 3

Микромеханические характеристики карбидов в хромомарганцевом чугуна в литом состоянии и после изотермических выдержек / *Micromechanical carbides characteristics in chromomagnetic cast iron in the cast state and after isothermal soaking*

№ п/п	Состояние исследуемых образцов	Микротвердость карбида Me_7C_3 , МПа	Микрохрупкость карбида Me_7C_3 , γ отн. ед.	Хрупкая микропрочность карбида Me_7C_3 , $\sigma_{вд}$	Трещиностойкость карбида Me_7C_3 , k_{1c}
1	В литом состоянии	15240	3,3	2,8	2,1
2	Изотермическая выдержка при 550°C	11447	2,5	2,1	1,6
3	Изотермическая выдержка при 500°C	12250	2,7	2,2	1,7
4	Изотермическая выдержка при 400°C	13141	2,8	2,3	1,8
5	Изотермическая выдержка при 350°C	8912	1,9	1,6	1,2
6	Изотермическая выдержка при 300°C	9460	2,05	1,7	1,3
7	Изотермическая выдержка при 250°C	9460	2,05	1,7	1,3
8	Изотермическая выдержка при 200°C	9460	2,05	1,7	1,3

Анализ данных таблиц 2, 3 свидетельствует, что микромеханические характеристики матрицы с понижением температуры изотермической выдержки от 550°C до 200°C по сравнению с литым состоянием повышаются, а эвтектического карбида – снижаются. Максимальные значения микромеханических характеристик матрицы наблюдаются при температурах изотермической выдержки 400 и 350°C, что связано, вероятно, с реализацией бейнитного превращения и присутствием в структуре хромомарганцевого чугуна α - фазы бейнита.

Очевидно, что закономерности изменения механических свойств хорошо коррелируют с данными рентгеноструктурного и локального рентгеноспектрального анализа.

Присутствие в структуре α - фазы бейнита и повышение степени легированности продуктов распада переохлажденного аустенита является определяющими факторами, которые обеспечивают увеличение микромеханических характеристик. Также дополнительным фактором, который обеспечивает упрочнение, может служить выделение мелкодисперсных карбидов из пресыщенной углеродом α - фазы.

Что касается снижения уровня микромеханических характеристик при увеличении изотермической выдержки, то это связано с тем, что одновременно реализуются несколько процессов, которые по-разному влияют на свойства: насыщение углеродом непревращенного аустенита, отпуск пресыщенной углеродом α - фазы, релаксационные процессы в матрице.

Результаты

Проведенный комплекс исследований показал, что фазовые, структурные превращения и ликвационные процессы, развивающиеся в хромомарганцевом чугуне при изотермических выдержках в интервале температур от 200 до 550°C, приводят к увеличению микротвердости и микромеханических характеристик матрицы, а

микромеханические характеристики карбидов снижаются по сравнению с литым состоянием.

Научная новизна и практическая ценность

Установлено, что уровень твердости хромомарганцевого чугуна в литом состоянии и после изотермических выдержек определяется как степень легированности матрицы, так и степенью легированности хромом эвтектического карбида и обусловлен фазовыми превращениями переохлажденного аустенита. Понимание механизмов фазовых превращений и структурных изменений, связанных с ликвационными процессами, и получение количественных закономерностей, описывающих формирование структурных составляющих при изотермических выдержках, позволит управлять структурой и свойствами, а также прогнозировать износостойкость изделий из хромомарганцевых чугунов.

Выводы

В работе изучено влияние ликвационных процессов, реализующихся в хромомарганцевом чугуне при изотермических выдержках, на твердость и микромеханические характеристики эвтектического карбида и матрицы.

Установлено, что уровень твердости чугуна в литом состоянии и после изотермических выдержек определяется как степенью легированности матрицы, так и степенью легированности хромом эвтектического карбида и обусловлен фазовыми превращениями переохлажденного аустенита (перлитным, бейнитным, мартенситным).

Фазовые превращения и структурные изменения, реализующиеся в хромомарганцевом чугуне в процессе изотермических выдержек в интервале температур от 550 до 200°C, приводят к увеличению микротвердости и микромеханических характеристик матрицы, а микромеханические характеристики карбидов в процессе изотермических выдержек снижаются по сравнению с литым состоянием.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Соколов О.Г. Железомарганцевые сплавы / О.Г. Соколов, К.Б. Кацов. – Киев: Наукова думка, 1982. – 212с. http://books.zntu.edu.ua/book_info.pl?id=212186
2. Чейлях А.П. Разработка и исследования новых экономнолегированных износостойких чугунов с метастабильной структурой для быстроизнашивающихся деталей / Чейлях А.П., Клок Д.В., Прекрасный С.В. // Металл и литье Украины. – 2006. – №9–10. – С. 13–17. <http://cgntb.dp.ua/library/callback/idisis/61081.html>.
3. Герек А., Байка Л. Легированный чугун – конструкционный материал. М.: Металлургия. – 1978. – 208 с. <http://www.twirpx.com/file/1981029/grant/>
4. Гуляев А.П. Металловедение. М.: Металлургия. – 1978. – 648 с. <http://www.twirpx.com/file/85832/>
5. Диаграммы состояния двойных систем на основе железа: справ. изд. О. Кубашевски / Пер. с англ. М.: Металлургия, 1985. <http://www.twirpx.com/file/230875/>
6. Волчок И. П., Нетребко В. В. Влияние марганца на процессы структурообразования износостойких высокохромистых чугунов // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. науч. тр. 2012. Вып. 64. С. 301–304. <https://goo.gl/001GyA>
7. Чейлях А. П. Экономнолегированные метастабильные сплавы и упрочняющие технологии. Харьков: ННЦ ХФТИ. - 2003. – 2012 с. <http://eir.pstu.edu/handle/123456789/5248>

8. Самсонов Г.В. Карбиды и сплавы на их основе / Г.В. Самсонов, Т.Я. Косолапова [и др.]. – М. – Киев: Наукова думка. – 1976. – с. 32-41. <http://padabum.net/d.php?id=206294>
9. Новиков Н.В. Методы микроиспытаний на трещиностойкость / Н.В. Новиков, С.Н. Дуб, С.И. Булычев // Заводская лаборатория. – 1988. – №7 – С. 60-67. <http://files.khadi.kharkov.ua/>
10. Влияние легирующих элементов на формирование структуры, фазового состава и свойств хромомарганцевого чугуна в литом состоянии / В.З. Куцова, М.А. Ковзель, А.В. Гребенева, И.В. Ратникова, О.О. Величко //Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2015. - № 3 (294). - С. 45 - 48. <http://www.metaljournal.com.ua/3-294-2015/>
11. Kinetics of phase transformations in chromium-manganese cast iron / V. Kutsova, M. Kovzel, P. Shvets, A. Grebeneva // Metallurgical and Mining Industry. – 2016. - № 9. - P. 47 - 52. https://www.metaljournal.com.ua/assets/Journal/english-edition/MMI_2016_9/007Kovzel.pdf

REFERENCES

1. Sokolov O.G. Zhelezomargantsevyie splavyi [Ferromanganese alloys]/ O.G. Sokolov, K.B. Katsov. – Kiev: Naukova dumka [Scientific thought], 1982. – 212p. [in Russian]
2. A.P. Cheylyah Razrabotka i issledovaniya novyih ekonomnolegированных iznosostoykikh chugunov s metastabilnoy strukturoy dlya bystroiznashivayuschihsvy detaley [Development and research of the new wear-resistant cast iron with metastable structure for faster wearing parts] / Metall i lite Ukrainy [Metal and casting of Ukraine],2006., №9–10., pp. 13–17. [in Russian]
3. Gerek.A., Bayka L. Legированный чугун– конструкционный материал [Alloyed cast iron - the material of construction]. М.: Metallurgiya [Metallurgy]. – 1978. – 208 p. [in Russian]
4. Gulyaev A.P. Metallovedenie [Metal science]. М.: Metallurgiya [Metallurgy]. – 1978. – 648p., [in Russian]
5. Diagrammyi sostoyaniya dvoynnyh sistem na osnove zheleza [Diagrams of the state of dual systems based on iron]: sprav. izd. O. Kubashevski / Per. s ang. М.: Metallurgiya [Metallurgy]., 1985 [in Russian]
6. I.P. Volchok, V.V. Ntrebko, Vliyanie margantsa na protsessyi strukturoobrazovaniya iznosostoykikh vysokokhromistyih chugunov [Influence of manganese on the structure formation processes in the wear-resistant high chromium cast iron] // Stroitelstvo, materialovedenie, mashinostroenie, 2012., vol. 64., p. 301–304. [in Russian]
7. A.P. Cheylyah, Ekonomnolegированные metastabilnyie splavyi i uprochnyayuschie tehnologii [Economically alloyed metastable alloys and reinforcing technology], Harkov: NNC HFTI, 2003. [in Russian]
8. Samsonov G.V. Karbidy i splavyi na ih osnove [Carbides and alloys based on them]/ G.V. Samsonov, T.Ya. Kosolapova [i dr.]. – М. – Киев: Наукова думка [Scientific thought],. – 1976. – pp. 32-41. [in Russian]
9. Novikov N.V. Metody mikroispytaniy na treschinostoykost [Methods of micro-tests for crack resistance] / N.V. Novikov, S.N. Dub, S.I. Bulyichov // Zavodskaya laboratoriya [Factory laboratory]. – 1988. – №7 – pp. 60-67. [in Russian]
10. Vliyanie legiruyuschih elementov na formirovaniye strukturyi, fazovogo sostava i svoystv hromomargantsevogo chuguna v litom sostoyanii [Influence of alloying elements on the formation of the structure, phase composition and properties of chromium-manganese cast iron in the cast state]/ V.Z. Kutsova, M.A. Kovzel, A.V. Grebeneva, I.V. Ratnikova, O.O. Velichko // Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost [Metallurgical and mining industry]. – 2015. - № 3 (294). - pp. 45 – 48 [in Russian]
11. Kinetics of phase transformations in chromium-manganese cast iron / V. Kutsova, M. Kovzel, P. Shvets, A. Grebeneva // Metallurgical and Mining Industry. – 2016. - № 9. - p. 47 - 52.

Статья рекомендована к публикации д-ром техн. наук, проф. Киндрачуком М.В. (Украина); д-ром техн. наук, проф. Чейляхом А.П. (Украина).