

ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА И СТРУКТУРЫ ИЗНОСОСТОЙКИХ БЕЛЫХ ЧУГУНОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

А. А. ЖУМАЕВ, Ю. Н. МАНСУРОВ, Дж. Дж. МАМАТКУЛОВ, Г. Д. УЛУГОВ*

Горнодобывающая промышленность Узбекистана ежемесячно использует сотни тонн белого износостойкого чугуна для изготовления деталей для машин и оборудования, добывающих природное сырье. Только Производственное объединение «Навоийский машиностроительный завод» (ПО «НМЗ») ежемесячно выпускает литые детали из износостойкого высоколегированного хромом белого чугуна объемом более 120 т ежемесячно. Большую часть деталей изготавливают для измельчителей горных пород, их износ в процессе работы на рудниках укорачивает срок службы машин и оборудования. Детали зарубежного оборудования: грунтовых насосов, футеровки размольных мельниц, гидротранспорта и другие изготовлены из белого чугуна, высоколегированного хромом, никелем, медью, титаном и другими химическими элементами. Ежегодный ввоз в республику деталей из чугунов сложного химического состава требует значительных затрат. В целях экономии средств за счет отказа от импорта деталей разработан отечественный износостойкий белый чугун марки 280X29НЛ, из которого в литейном цехе НМЗ отливают трущиеся, работающие на износ в рудниках детали горнодобывающего оборудования. Учитывая, что ферросплавы для производства чугуна также импортируют, то экономия средств в процессе производства деталей горного оборудования взамен изношенных незначительна. Целью настоящей работы является оптимизация состава высоколегированного износостойкого белого чугуна для его замены в промышленности на экономной легированный аналог, а также улучшение структуры оптимизированного по составу белого износостойкого чугуна для получения требуемого уровня эксплуатационных свойств деталей, работающих в условиях трения и износа. Для этого были изучены фазовые превращения, структура и свойства белого чугуна, условия литья деталей. По результатам исследований разработаны рекомендации по экономному легированию и технологии литья деталей, работающих на трение и износ.

Ключевые слова: железо, углерод, чугуны, состав, легирующие элементы, структура, свойства, литье, холодильники.

DOI: 10.17580/chm.2020.12.01

Промышленность Узбекистана развивается быстрыми темпами. Поставлена задача по увеличению степени локализации производства, снижению импорта и увеличению экспорта продукции. Это также относится к горно-металлургической промышленности, в том числе к ее добывающей отрасли. Предприятия горнодобывающей отрасли промышленности Узбекистана ежемесячно используют сотни тонн белого износостойкого чугуна при изготовлении деталей для машин и оборудования, добывающих

природное сырье. Только ПО «НМЗ» ежемесячно производит литые детали из износостойкого высоколегированного хромом белого чугуна объемом около 120 т ежемесячно. Большую часть деталей изготавливают для измельчителей горных пород, износ и трение которых в процессе работы на рудниках укорачивают срок службы деталей, соответственно, машин и оборудования. Оборудование поставляют из-за рубежа, и детали грунтовых насосов, футеровки размольных мельниц, гидротранспорта и другие на нем изготовлены из белого чугуна, высоколегированного хромом, никелем, медью, титаном и др. Естественно, ежегодный ввоз в республику деталей из чугунов сложного химического состава требует немалых затрат. В целях экономии средств за счет отказа от импорта деталей разработан отечественный износостойкий белый чугун марки 280X29НЛ, из которого в литейном цехе НМЗ отливают трущиеся, работающие на износ в рудниках детали горнодобывающего оборудования. Учитывая, что ферросплавы для производства чугуна также импортируют, то экономия средств в процессе производства деталей для горного оборудования взамен изношенных незначительна.

Целью настоящей работы является оптимизация состава высоколегированного износостойкого белого чугуна для его замены в промышленности на

* *Навоийское отделение АН Республики Узбекистан, Навои, Узбекистан:*

А. А. Жумаев, аспирант базовой докторантуры;

Институт общей и неорганической химии АН Республики Узбекистан, Ташкент, Узбекистан:

докт. тех. наук Ю. Н. Мансуров, директор, профессор Ташкентского государственного транспортного университета;

Самаркандский государственный архитектурно-строительный институт, Самарканд, Узбекистан:

докт. тех. наук Дж. Дж. Маматкулов, профессор;

ПО «Навоийский машиностроительный завод», Навои, Узбекистан:

Г. Д. Улугов, начальник центральной заводской лаборатории;

*эл. почта: ahmadjon_jumayev@mail.ru;
yulbarsmans@gmail.com*

© Жумаев А. А., Мансуров Ю. Н., Маматкулов Дж. Дж., Улугов Г. Д., 2020

Таблица 1 Химический состав исследованных сплавов										
Марка сплава	Содержание элементов, % (мас.)									
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Ti	Cu	P+S	Fe
280X29НЛ	2,7	0,9	0,5	28	0,8	0,1	–	0,15	0,5	Ост.
Зарубежный аналог	2,8	0,6	1,4	29	0,63	0,2	0,3	0,14	0,4	Ост.

экономно легированный аналог, а также улучшение структуры оптимизированного по составу белого износостойкого чугуна для получения требуемого уровня эксплуатационных свойств деталей, работающих в условиях трения и износа.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- установлены фазовые превращения в трех-, четырехкомпонентных системах, состоящих из химических элементов, входящих в состав чугуна 280X29НЛ;
- определены структура и структурные составляющие высоколегированного белого износостойкого чугуна;

- изучены технологии литья деталей горного оборудования и предложена система охлаждения отливок, обеспечивающая повышенные эксплуатационные свойства деталей.

По результатам исследований разработаны рекомендации по экономному легированию и технологии литья деталей, работающих на трение и износ.

Материалы и методы исследования

В работе использованы сплавы, состав которых представлен в табл. 1.

Из табл. 1 следует, что зарубежный аналог легирован больше, чем сплав, применяемый в отечественной практике. По содержанию углерода сплавы идентичны. Поэтому за основу анализа фазового состава сплавов была принята композиция Fe + 3 % (мас.) С.

Сплавы готовили в индукционных печах в литейном цехе НМЗ, где можно отливать слитки весом от нескольких граммов (с использованием специальных приспособлений и тиглей) до нескольких сотен килограммов. Для приготовления модельных сплавов использовали железо, никель, титан, хром, кобальт чистотой 99,9 %, углерод чистотой 99,8 %. Промышленные сплавы дошихтовывали металломом в виде отработавших чугуновых деталей, предварительно определив их средний химический состав. Составы сплавов контролировали ручным рентгеноспектральным флуоресцентным спектрометром MagiX.

По результатам предварительно рассчитанных и построенных с использованием программы Thermo-Calc трех-, четырехкомпонентных диаграмм состояния сплавов на основе железа с углеродом и легирующими элементами из изо- и политермических разрезов выбраны области с благородной (коэффициент формы фаз более 0,5) дисперсной структурой нескольких фаз. Выполнен анализ областей диаграмм состояния с мно-

гофазной структурой, и на его основе оптимизированы составы износостойких белых чугунов.

Микроструктуру сплавов изучали на металлографическом микроскопе Neophot-2. Для этого из отливок вырезали прямоугольные образцы, которые травили реактивом, включающим по 15 мл азотной, соляной кислот и глицерина. Реактив нагревали до 60–65 °С, время травления составило 10 мин.

Фазовый анализ сплавов, химический состав фаз определяли методами микрорентгеноспектрального фазового и элементного анализа с помощью растрового электронного микроскопа Tescan. Для достижения равновесного состояния в сплавах образцы отжигали в печи Nabertherm с возможностью нагрева до 1700 °С. Общее время выдержки в процессе закалки составило 12 ч, температура нагрева 900–920 °С.

В целях получения направленной структуры сплавов использовали водоохлаждаемые изложницы. Объем воды для обеспечения стабильного охлаждения составил 100–120 м³/ч, скорость подачи воды в изложницу — не ниже 5 м/с.

Механические свойства отливок определяли по ГОСТ 7293–85 [1]. Сравнительную износостойкость оценивали по методике ГОСТ 23.208–79 [2] при трении чугунов с абразивными частицами разной твердости.

Результаты исследований и их обсуждение

Для решения поставленных задач изучали сплавы, представленные в табл. 1. Качественно составы сплавов практически одинаковы, количественно различаются содержанием легирующих элементов. Так, в зарубежном аналоге суммарно содержится 35,47 % добавок и примесей, в отечественном, особенно по содержанию хрома и никеля, — 33,65 %. Отечественный сплав в среднем содержит меньше хрома, никеля и не содержит титан. Однако с учетом ошибки определения химического состава нельзя говорить о существенном различии химического состава зарубежного и отечественного сплавов. Сплав 280X29НЛ, заменив в производстве зарубежный аналог, тем не менее не обеспечил экономическую выгоду: феросплавы, используемые для приготовления белого чугуна, являясь импортными материалами, не снизили стоимость быстроизнашиваемых деталей. Поэтому задача по снижению стоимости белого чугуна для производства износостойких деталей приобрела большую актуальность. Решить ее можно за счет снижения степени легирования, уменьшения концентрации добавок в составе чугуна.

С этой целью проведен анализ состава сплавов в плане формирования их фазового состава. Для этого рассчитаны и построены трех- и четырехкомпонентные диаграммы состояния, их изо- и политермические разрезы с помощью программы Thermo-Calc.

Из опубликованной научной литературы известно [3–7], что и хром, и никель способствуют повышению износа деталей из белых чугунов. По данным резуль-

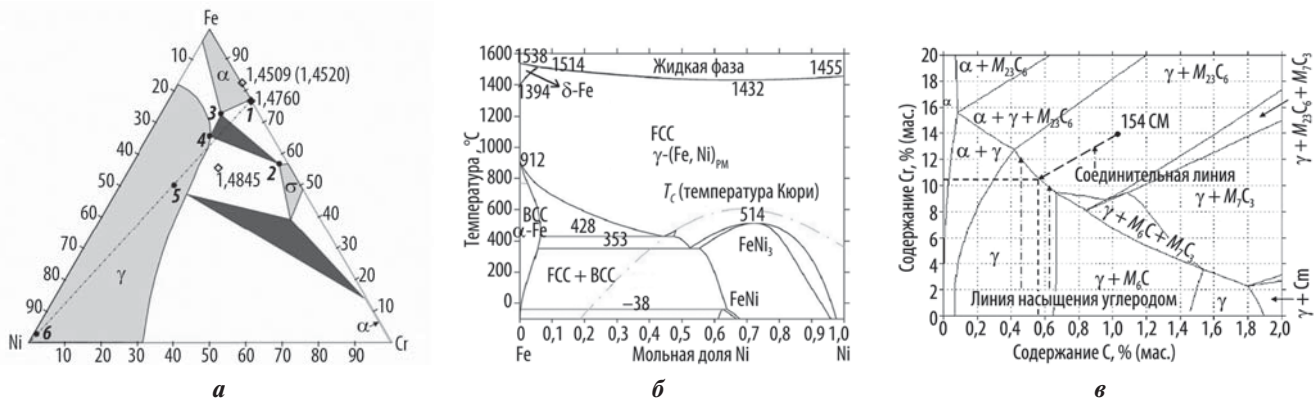


Рис. 1. Примеры фазовых равновесий в металлических системах:
 а — изотермический разрез Fe – Ni – Cr; б — политермический разрез Fe – 30 % Cr – Ni;
 в — политермический разрез Fe – Cr – C

татов исследования других авторов [8–12], свойства чугунов зависят от качества исходного сырья (шихтовых материалов), включая ферросплавы (их Узбекистан импортирует, что приводит к удорожанию чугунов), наличия инородных включений, в том числе шлаковых, технологии плавки, скорости кристаллизации, геометрических параметров отливок и т. п., в том числе от выбора основы белого чугуна. Для изготовления деталей горного оборудования использовали высокохромистые чугуны, где содержание хрома достигает 30 %, никеля — 1,5 %. Из анализа химического состава чугунов следует, что в процессе изготовления зарубежного аналога использовали также марганцевые и никелевые чугуны, содержащие до 1,5 % кремния [13–16].

Для оптимизации состава износостойкого белого чугуна были рассчитаны и построены более 30 диаграмм состояния (рис. 1) трех- и четырехкомпонентных систем на основе сплавов железа с углеродом легирующих компонентов с основными легирующими элементами.

Изучение фазового состава сплавов, а также анализ области существования фаз в многокомпонентных системах показали, что количество легирующих элементов в известном отечественном сплаве (его зарубежном аналоге) можно уменьшить. Основные легирующие элементы (см. рис. 1) образуют вместе с железом сложные карбиды типа $M_{23}C_6$, M_7C_3 , M_6C , где M — металлы Fe, Ni, Cr, Mo. Эти же элементы могут образовать и между собой фазы типа FeNi₃ или FeNi. В структуре встречаются также σ -фаза (Fe – Cr – Mo), χ -фаза (Fe₃₆Cr₁₂Mo₁₀), фаза Лавеса (η) — Fe₂Mo и P-фаза сложного состава — Mo₁₂(Mo,Cr,Ni)₂₀(Cr,Ni)₂₄.

Типичная структура сложнолегированного сплава и распределение элементов $K\alpha$ -излучении показана на рис. 2.

На основании анализа построенных диаграмм состояний, их изо- и политермических разрезов, распределения химических элементов по структуре сплавов, результатов изучения фазового состава высоколегированного белого чугуна можно утверждать, что уменьшение количества легирующих элементов не влияет на фазовый состав и структуру сплавов, следовательно, на

эксплуатационные свойства деталей из белого чугуна. В широком диапазоне концентраций основных легирующих элементов фазы структурные составляющие практически не меняются: кроме твердого раствора на основе железа, в структуре можно наблюдать простые и сложные карбиды. Для подтверждения данного предположения были изучены механические свойства модельных сплавов с различным содержанием легирующих элементов. Линейная, логарифмическая, экспоненциальная, степенная и полиномиальная зависимости износостойкости от концентрации элемента построены для легирующих элементов, используемых для легирования белых чугунов: бор, углерод, молибден, марганец, хром, титан, никель. Механические свойства (абразивный износ и твердость) модельных сплавов показали, что максимально точное значение зависимости свойств от концентрации элементов описывается при модели полиномиальной зависимости [17–19], где коэффициент пропорциональности приближается к единице. Анализ свойств модельных сплавов показал, что не все фазы в высоколегированном чугуне способствуют повышению коэффициента износостойкости. Установлено, что отвечают за устойчивость к трению и износ, обеспечивают износостойкость белых чугунов карбиды, образованные железом, хромом, в том числе сложные. Стабильно улучшает твердость и износостойкость хром, который в сплавах образует карбиды Cr₂₃C₆, Cr₇C₃, Cr₆C, а также сложные карбиды типа σ - и χ -фаз. При этом концентрацию хрома можно ограничить до 18 % (мас.). В состав чугунов всегда входят кремний, марганец, никель, медь, а также примеси серы и фосфора. В процессе приготовления разрабатываемого чугуна используют металлолом в виде отработавших чугунных деталей, которые также содержат названные элементы. Поэтому в разрабатываемом составе экономно легированного сплава эти элементы учтены.

Проведенный анализ свойств, структуры, фазового состава позволил установить степень легирования износостойких белых чугунов, которые используют для изготовления деталей горнодобывающего оборудования. Был рекомендован к производству сплав, условно обозначенный 330X17Л — экономно легиро-

ванный белый износостойкий чугун, содержащий в среднем, %: 3,3 С, 17 Cr, 0,5 Si, до 0,4 Ni, до 0,2 Mn, до 0,1 Cu, до 0,5 S+P. Суммарное количество добавок и примесей составило 22 %, что на 13,65 % меньше, чем в используемом ранее отечественном сплаве. В литом состоянии рекомендованный белый чугун уступает по уровню механических свойств высоколегированному 280Х29НЛ. В термообработанном состоянии свойства чугунов сопоставимы, например, твердость по HRC составила 58–60 ед. у экономно легированного и 60–62 ед. — у высоколегированного.

Эксперименты с модельными сплавами показали также, что износостойкость сплавов зависит от направленности карбидов, а именно: карбиды должны находиться перпендикулярно изнашиваемой поверхности деталей, что обеспечивает максимальную износостойкость. В целях получения направленной структуры были использованы холодильники.

Анализ микроструктуры высоко- и экономно легированного чугунов показал, что в более легированном чугуне при нагреве под закалку до 920 °С сохранились в большом количестве нерастворенные карбиды, что свидетельствует об излишней степени их легированности. В то же время экспериментально показано, что структурные составляющие, в частности колонии эвтектик, большей осью направлены в сторону тепло-

отвода или перпендикулярно поверхности слитков. Поскольку на трение и износ работают в основном карбиды, была попытка получить направленную структуру экономно легированного чугуна (рис. 3), для чего под формы были установлены холодильники, обеспечивающие направленную кристаллизацию карбидов.

На рис. 3, а показана структура чугуна, закристаллизованного без использования холодильников, — карбиды, расположенные на матрице, ориентированы в разных направлениях. На рис. 3, б и в показана структура чугунов, в процессе кристаллизации которых использовали холодильники: видна четкая направленность карбидов вдоль и перпендикулярно теплоотводу соответственно.

Изучение механических свойств образцов белого чугуна (табл. 2) после термической обработки, а также четко выраженное направление кристаллизации показало, что уровень свойств отвечает требованиям потребителя и изготовителя деталей горнодобывающих машин.

Из табл. 2 следует, что механические свойства экономно легированного белого чугуна 330Х17Л в термически обработанном состоянии с карбидами, направленными перпендикулярно отводу тепла или рабочей поверхности деталей, сопоставимы со свойствами высоколегированного чугуна 280Х29НЛ.

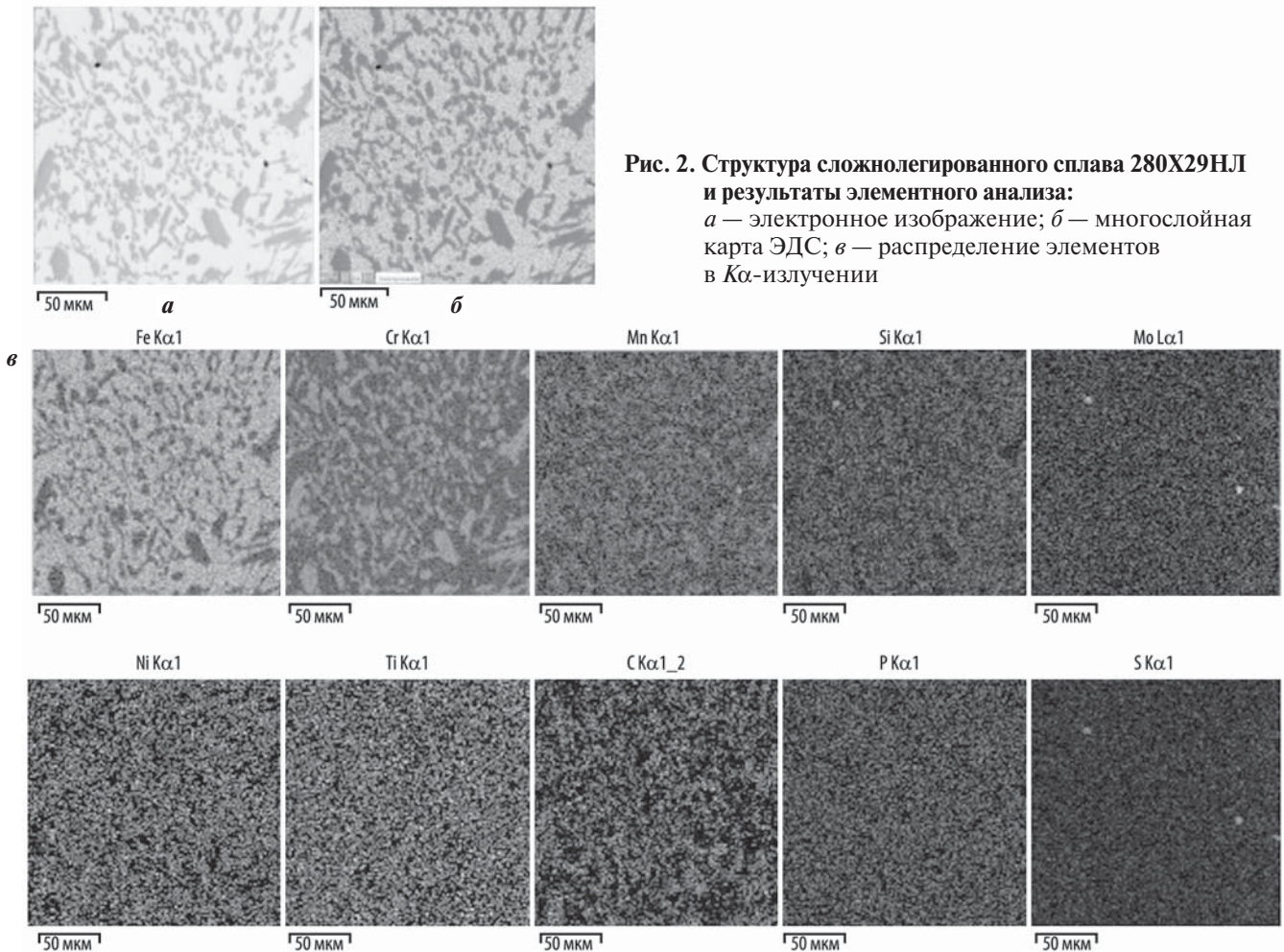


Рис. 2. Структура сложнолегированного сплава 280Х29НЛ и результаты элементного анализа: а — электронное изображение; б — многослойная карта ЭДС; в — распределение элементов в К α -излучении

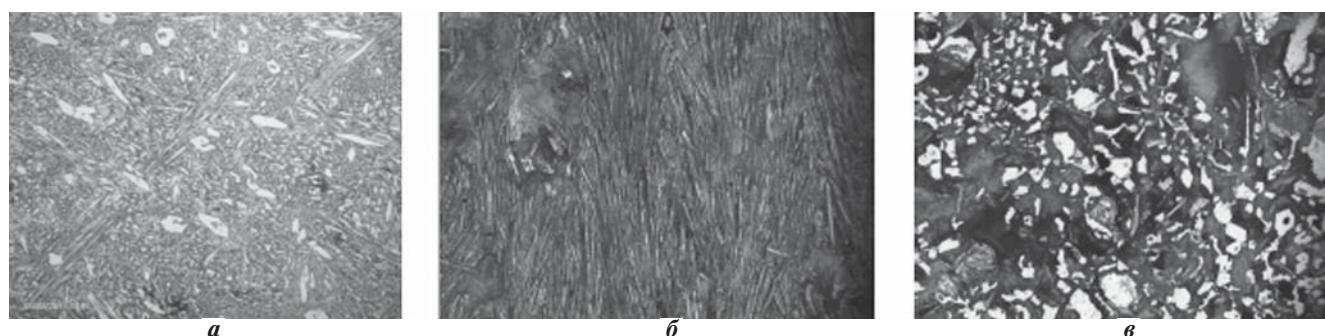


Рис. 3. Микроструктура чугуна 330X17Л:
 а — закаленное состояние; б — состояние, направленно-закристаллизованное вдоль теплоотвода;
 в — состояние, направленно-закристаллизованное перпендикулярно теплоотводу

Таблица 2 Механические свойства износостойких белых чугунов в различных состояниях						
Состояние	Механические свойства 330X17Л			Механические свойства 280X29НЛ		
	Твердость, HRC	Износостойкость, $K_{и}$, % (отн.)	Временное сопротивление, σ_B , МПа	Твердость, HRC	Износостойкость, $K_{и}$, % (отн.)	Временное сопротивление, σ_B , МПа
Литое	51	10,5	356	52	11,5	378
Термически обработанное	58	10	394	60	13	402
Вдоль кристаллизации	58	9	410	60	11	420
Поперек кристаллизации	64	5	491	64	6	501

Примечание. Представлены средние значения.

Таким образом, результаты исследования позволили заменить чугун марки 280X29НЛ на менее легированный 330X17Л. Предложенный чугун не уступает ранее применявшемуся по уровню механических свойств, при этом его стоимость ниже, а срок службы деталей увеличен минимум на 20 %.

Выводы

1. На основании комплексного изучения с использованием программы Thermo-Calc и методов построения карт элементного анализа фазового состава, фазовых равновесий, диаграмм состояния многокомпонентных систем, их изо- и политермических разрезов железоуглеродистых сплавов с легирующими элементами установлен фазовый состав, изучена структура и оптимизирован состав высоколегированного износостойкого белого чугуна. Комплексное изучение структуры, свойств, фазовых равновесий и состава белых чугунов позволило разработать и рекомендовать промышленности состав экономно легированного белого чугуна.

2. Установлено, что износостойкость белых чугунов обеспечивают карбиды железа, хрома и никеля, что позволило использовать метод направленной кристаллизации для получения структуры, в которой карбиды расположены перпендикулярно плоскости износа. Оптимизированная структура экономно легированного белого чугуна позволила сохранить уровень эксплуатационных свойств деталей, производимых ПО

«НМЗ», соответствующий требованиям к оборудованию потребителей деталей, ремонтирующих оборудование для горнодобывающей промышленности Узбекистана.

3. По оценке специалистов НМЗ, экономический эффект от использования экономно легированного износостойкого белого чугуна составил не менее 500 млн сумов в год. **ЧМ**

Библиографический список

- ГОСТ 7293–85. Чугун с шаровидным графитом для отливок. Марки. — Введ. 01.01.1987.
- ГОСТ 23.208–79. Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытания материалов на износостойкость при трении о нежестко закрепленные абразивные частицы. — Введ. 01.03.1981.
- Гарбер М. Е. Износостойкие белые чугуны: свойства, структура, технология, эксплуатация. — М.: Машиностроение, 2010. — 280 с.
- Konar B., Kim J., Jung I. Critical Systematic Evaluation and Thermodynamic Optimization of the Fe-RE System: RE = La, Ce, Pr, Nd and Sm // Journal Phase Equilibria and Diffusion. 2016. Vol. 37, Iss. 4. P. 438–458.
- Kolokoltsev V. M., Petrochenko E. V., Molochkova O. S. Influence of boron modification and cooling conditions during solidification on structural and phase state of heat- and wear-resistant white cast iron // CIS Iron and Steel Review. 2018. Vol. 15. P. 11–15.
- Ali K., Ghosh P. S., Arya A. A DFT study of structural, elastic and lattice dynamical properties of Fe2Zr and FeZr2 intermetallics // Journal Alloys Compd. 2017. Vol. 723. P. 611–619.
- Mukhamedov B. O., Ponomareva A. V., Abrikosov I. A. Spinodal decomposition in ternary Fe–Cr–Co-system // Journal Alloys Compd. 2017. Vol. 695. P. 250–256.
- Karantzalis A. E., Lekatou A., Kapoglou A., Mavros H., Dracopoulos V. Phase Transformations and Microstructural Observations During Subcritical Heat Treatments of a High-Chromium Cast Iron // Journal of Materials Engineering and Performance. 2012. Vol. 21, Iss. 6. P. 1030–1039.
- Sain P. K., Sharma C. P., Bhargava A. K. Microstructure Aspects of a Newly Developed, Low Cost, Corrosion-Resistant White Cast Iron // Journal Metallurgical and Materials Transactions A. 2013. Vol. 44. P. 1665–1671.
- Yoganandh J., Natarjan S., Kumaresh S. P. Babu. Erosive Wear Behavior of Nickel-Based High Alloy White Cast Iron Under Mining Conditions Using Orthogonal Array // Journal of Materials Engineering and Performance. 2013. Vol. 22, Iss. 9. P. 2534–2540.
- Петроченко Е. В. Взаимосвязь химического состава, структуры и свойств комплексно-легированных белых чугунов в литом

- состоянии // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2012. № 3. С. 51–55.
12. Kolokoltsev V. M., Petrochenko E. V. Structure Feature And Properties Of High-Alloy White Irons // Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University. 2013. No. 5, Iss. 45. P. 3–8.
 13. Ponomareva A. V., Ruban A. V., Mukhamedov B. O., Abrikosov I. A. Effect of multicomponent alloying with Ni, Mn and Mo on phase stability of bcc Fe–Cr alloys // Acta Materialia. 2018. Vol. 150. P. 117–129.
 14. Kabliman E., Blaha P., Schwarz K., Peil O. E., Ruban A. V., Johansson B. Configurational thermodynamics of the Fe–Cr σ phase // Physical Review B 84. 2011. Article ID 184206.
 15. Naraghi R., Selleby M., Ågren J. Thermodynamics of stable and metastable structures in Fe–C system // Calphad. 2014. Vol. 46. P. 148–158.
 16. Колокольцев В. М., Петроченко Е. В., Молочкова О. С. Влияние Al на фазовый состав, структуру и свойства жароизносостойкого чугуна системы Cr–Mn–Ni–Ti // Черные металлы. 2018. № 7. С. 6–11.
 17. Abrikosov I. A., Ponomareva A. V., Steneteg P., Barannikova S. A., Alling B. Recent progress in simulations of the paramagnetic state of magnetic materials // Current Opinion Solid State Materials Science. 2016. Vol. 20. P. 85–106.
 18. Кравченко Н. С., Ревинская О. Г. Методы обработки результатов измерений и оценки погрешностей в учебном лабораторном практикуме. — Томск, 2011. — 173 с.
 19. Yang Yi., Tan L., Bei H., Busby J. T. Thermodynamic modeling and experimental study of the Fe–Cr–Zr system // Journal Nucl. Mater. 2013. Vol. 441, Iss. 1-5. P. 190–202.

DOI: 10.17580/chm.2020.12.01

“CHERNYE METALLY”, 2020, No. 12, pp. 4–9

OPTIMIZATION OF THE COMPOSITION AND STRUCTURE OF WEAR-RESISTANT WHITE CAST IRONS USED IN THE MINING INDUSTRY

A. A. Zhumaev¹, postgraduate student;
 Yu. N. Mansurov², Dr. Eng., Director, Prof. of the Tashkent State Transport University;
 D. D. Mamatkulov³, Dr. Eng., Prof.;
 G. D. Ulugov⁴, Head of the Central Plant Laboratory

¹ Navoi branch of the Academy of Sciences of Uzbekistan (Navoi, Uzbekistan)

² Institute of General and Inorganic Chemistry of the Academy of Sciences of Uzbekistan (Tashkent, Uzbekistan)

³ Samarkand State Institute of Architecture and Civil Engineering (Samarkand, Uzbekistan)

⁴ Navoi Machine-Building Plant (Navoi, Uzbekistan)

E-mail: ahmadjon_jumayev@mail.ru; yulbarsmans@gmail.com

Abstract: The mining industry of Uzbekistan uses hundreds of tons of white wear-resistant cast iron monthly for the manufacture of parts for machinery and equipment that extract natural raw materials. Only the Production Association Navoi Machine-Building Plant (PO «NMZ») monthly produces cast parts from wear-resistant high-chromium alloyed white cast iron with a volume of more than 120 tons per month. Most of the parts are made for rock crushers; their wear during work in mines shortens the service life of machinery and equipment. Parts of foreign equipment: dredge pumps, lining of grinding mills, hydraulic transport and others are made of white cast iron, highly alloyed with chromium, nickel, copper, titanium and other chemical elements. The annual import into the republic of parts made of cast irons of complex chemical composition requires significant costs. In order to save money by refusing to import parts, a domestic wear-resistant white cast iron of grade 280Kh29NL was developed, from which rubbing parts, operating under wear conditions in mines, for mining equipment are cast in the foundry of the Navoi Machine-Building Plant. Considering that ferroalloys for the production of cast iron are also imported, the cost savings in the production of mining equipment parts instead of worn-out ones is insignificant. The purpose of this work is to optimize the composition of highly alloyed wear-resistant white cast iron for its replacement in industry with an economically alloyed analogue, as well as to improve the structure of the composition-optimized white wear-resistant cast iron to obtain the required level of performance properties of parts operating under friction and wear conditions. For this, phase transformations, the structure and properties of white cast iron, and the conditions for casting parts were studied. Based on the research results, recommendations were developed for economical alloying and casting technology for friction and wear parts.

Key words: iron, carbon, cast irons, composition, alloying elements, structure, properties, casting, refrigerators.

References:

1. GOST 7293–85. Spheroidal graphite iron for castings. Grades. Introduced: 01.01.1987.
2. GOST 23.208–79. Ensuring of wear resistance of products. Wear resistance testing of materials by friction against loosely fixed abrasive particles. Introduced: 01.03.1981.
3. Garber M. E. Wear-resistant white cast irons: properties, structure, technology, operation. Moscow: Mashinostroenie, 2010. 280 p.
4. Konar B., Kim J., Jung I. Critical Systematic Evaluation and Thermodynamic Optimization of the Fe–RE System: RE = La, Ce, Pr, Nd and Sm. *Journal Phase Equilibria and Diffusion*. 2016. Vol. 37, Iss. 4. pp. 438–458.
5. Kolokoltsev V. M., Petrochenko E. V., Molochkova O. S. Influence of boron modification and cooling conditions during solidification on structural and phase state of heat- and wear-resistant white cast iron. *CIS Iron and Steel Review*. 2018. Vol. 15. pp. 11–15.
6. Ali K., Ghosh P. S., Arya A. A DFT study of structural, elastic and lattice dynamical properties of Fe₂Zr and FeZr₂ intermetallics. *Journal Alloys Compd.* 2017. Vol. 723. pp. 611–619.
7. Mukhamedov B. O., Ponomareva A. V., Abrikosov I. A. Spinodal decomposition in ternary Fe–Cr–Co system. *Journal Alloys Compd.* 2017. Vol. 695. pp. 250–256.
8. Karantzalis A. E., Lekatou A., Kapoglou A., Mavros H., Dracopoulos V. Phase Transformations and Microstructural Observations During Subcritical Heat Treatments of a High-Chromium Cast Iron. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2012. Vol. 21, Iss. 6. pp. 1030–1039.
9. Sain P. K., Sharma C. P., Bhargava A. K. Microstructure, Aspects of a Newly Developed, Low Cost, Corrosion-Resistant White Cast Iron. *Journal Metallurgical and Materials Transactions A*. 2013. Vol. 44. pp. 1665–1671.
10. Yoganandh J., Natarjan S., Kumaresh S. P. Babu. Erosive Wear Behavior of Nickel-Based High Alloy White Cast Iron Under Mining Conditions Using Orthogonal Array. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2013. Vol. 22, Iss. 9. pp. 2534–2540.
11. Petrochenko E. V. Interconnection, between chemical composition, structure and properties of complex-alloyed white irons in a cast condition. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya*. 2012. No. 3. pp. 51–55.
12. Kolokoltsev V. M., Petrochenko E. V. Structure Feature And Properties Of High-Alloy White Irons. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni G. I. Nosova*. 2013. No. 5, Iss. 45. pp. 3–8.
13. Ponomareva A. V., Ruban A. V., Mukhamedov B. O., Abrikosov I. A. Effect of multicomponent alloying with Ni, Mn and Mo on phase stability of bcc Fe–Cr alloys. *Acta Materialia*. 2018. Vol. 150. pp. 117–129.
14. Kabliman E., Blaha P., Schwarz K., Peil O. E., Ruban A. V., Johansson B. Configurational thermodynamics of the Fe–Cr σ -phase. *Physical Review B* 84. 2011. Article ID 184206.
15. Naraghi R., Selleby M., Ågren J. Thermodynamics of stable and metastable structures in Fe–C system. *Calphad*. 2014. Vol. 46. pp. 148–158.
16. Kolokoltsev V. M., Petrochenko E. V., Molochkova O.S. Al influence on the phase composition, structure and properties of heat- and wear-resistant cast iron of Cr–Mn–Ni–Ti system. *Chernye Metally*. 2018. No. 7. pp. 6–11.
17. Abrikosov I. A., Ponomareva A. V., Steneteg P., Barannikova S. A., Alling B. Recent progress in simulations of the paramagnetic state of magnetic materials. *Current Opinion Solid State Materials Science*. 2016. Vol. 20. pp. 85–106.
18. Kravchenko N. S., Revinskaya O. G. Methods for processing measurement results and assessing errors in an educational laboratory practice. Tomsk, 2011. 173 p.
19. Yang Yi., Tan L., Bei H., Busby J. T. Thermodynamic modeling and experimental study of the Fe–Cr–Zr system. *Journal Nucl. Mater.* 2013. Vol. 441, Iss. 1-5. pp. 190–202.