

На правах рукописи

ЗАЙЦЕВА АЛЕКСАНДРА АЛЕКСАНДРОВНА

**УЛУЧШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ
ВАЛКОВОГО ЧУГУНА ПУТЕМ МИКРОЛЕГИРОВАНИЯ
БОРОМ**

Специальность 05.16.04 – Литейное производство

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**



Магнитогорск – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова».

Научный руководитель

Вдовин Константин Николаевич

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой литейного производства и материаловедения ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Официальные оппоненты:

Мирзоян Генрих Сергеевич,

доктор технических наук, профессор,
ООО «НТК ЦНИИТМАШ Металл»,
г. Москва, генеральный директор.

Тухватулин Ильдар Халитович,

кандидат технических наук,
ЗАО «Кушвинский завод прокатных валков»,
г. Кушва, заместитель главного металлурга.

Ведущая организация -

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет),
г. Челябинск.

Защита состоится «16» июня 2015 года в 16:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.111.01 при ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова» по адресу: 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, МГТУ, малый актовй зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова» и на сайте www.magtu.ru.

Автореферат разослан «___» апреля 2015 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Селиванов Валентин Николаевич

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Прокатное производство, в настоящее время, играет важнейшую роль в машиностроении, уровень которого характеризует состояние мировой экономики. Огромное значение прокатного производства подтверждается ежегодным увеличением выпуска проката: трубный прокат пользуется огромным спросом в газовой и нефтяной промышленности, листовая сталь приобретает в огромных количествах для производства химического оборудования, автомобилей, вагонов, холодильных камер и прочих металлоконструкций.

Постоянно возрастающий спрос в качественной прокатной продукции приводит к необходимости реконструкции старых и строительства новых уникальных прокатных станов для которых характерны большие объемы производства, повышенный уровень механизации, скорость прокатки и требования безопасности, что требует качественного исполнения прокатных валков.

В связи с этим актуальной научно-технической проблемой, представляющей значительный практический и научный интерес для литейного производства, является повышение эксплуатационных свойств прокатных валков.

Степень разработанности темы. Основным критерием качества прокатных валков является их стойкость, поскольку она оказывает существенное влияние на себестоимость проката, так как расход валков в руб. на 1 т проката составляет 15...20 % от общей стоимости переделов.

Наиболее обширные исследования в направлении повышения эксплуатационных характеристик валков проведены: А. Е. Кривошеев, Н. А. Будагьянц, В. Е. Карский, Г. С. Мирзоян, К. Н. Вдовин, Р. Х. Гималетдинов, С. В. Цыбров и др., которыми заложены теоретические и технологические основы процесса изготовления литых прокатных валков. Однако их стойкость, в настоящее время, находится на недостаточно высоком уровне, поскольку при прокатке возникают различные дефекты, связанные с их микроструктурой и пониженной износостойкостью.

Цель работы: повышение эксплуатационных свойств прокатных валков путём выбора легирующего элемента и введения в их рабочий слой.

Для достижения поставленной цели решали следующие задачи:

1. Анализ существующей технологии изготовления центробежно-литых листопркатных чугунных валков ЗАО «Магнитогорский завод прокатных валков» (МЗПВ).

2. Изучение влияния химических элементов на микроструктуру и износостойкость чугуна рабочего слоя прокатных валков исполнения ЛПХНМд-71 И (Ц).

3. Исследование фазового состава, микроструктуры и механических свойств (твёрдость, износостойкость) чугуна ЛПХНМд-71 И (Ц) до и после введения бора.

4. Изучение воздействия бора на характеристики фазовых превращений чугуна ЛПХНМд-71 И (Ц) до и после термической обработки.

Научная новизна работы:

1. На основе теоретических данных и экспериментальных исследований установлена прямо пропорциональная зависимость между содержанием бора в чугуне в диапазоне 0,01...0,09 % и величинами твердости и микротвердости структурных составляющих микроструктуры индефинитных валков исполнения ЛПХНМд-71 И (Ц).

2. Выявлено, что при содержании бора 0,30...0,33 % в рабочем слое индефинитных валков происходит снижение балла металлической матрицы (1, 2 балл мартенсита). Введение бора способствует выделению графита металлической матрицы шаровидной формы (ШГф3, ШГф4) с равномерным распределением (ШГр1).

4. Выявлено, что при введении бора в индефинитный валковый чугун образует химические соединения как с железом - бориды типа Fe_3B , так и с углеродом - карбиды бора следующих типов: B_4C , $B_{10}C$ и $B_{13}C_2$, которые способствуют повышению его износостойкости.

5. Экспериментально определен температурный диапазон – 398...417 °С, выше которого происходит распад мартенсита микролегированного бором чугуна рабочего слоя валка. Диапазон распада мартенсита исследуемого чугуна без бора - 450...497 °С.

Практическая значимость работы:

Результаты работы расширяют перечень легирующих элементов, применяемых для рабочего слоя чугунных индефинитных листопркатных валков.

1. Получены показатели стойкости центробежно-литых валков исполнения ЛПХНМд-71 (И) Ц после введения в их рабочий слой рационального содержания бора 0,027...0,035 %.

2. Выявлено влияние содержания бора в пределах 0,01...0,09 % на образование необходимого балла мартенсита и на твердость и микротвердость структурных составляющих чугуна рабочего слоя индефинитных валков

3. Определены рациональные температуры проведения отпуска индефинитных валков (398...417 °С).

Реализация результатов работы

Результаты работы опробованы и предложенный легирующий элемент – бор внедрен в технологический процесс производства валков исполнения ЛПХНМд-71 И (Ц), имеющих массу 12,6...12,8 т, в условиях МЗПВ (г. Магнитогорск). Эти валки прошли производственные испытания в условиях ОАО «ММК» (ММК) в листопркатном цехе № 10 (ЛПЦ-10) на широкополосном стане горячей прокатки (ШСГП) «2000» в чистовых клетях № 11-13 (г. Магнитогорск). Установлено, что благодаря бору стойкость валков возросла на 4,5...5 % с экономическим эффектом 1 300 000,0 руб./год.

Методология и методы исследования

Работа выполнена с применением современных методов исследования: химического и фазового состава, механических свойств валкового чугуна до и после введения бора.

Задачи исследования направлены на выявление закономерностей влияния бора на структурные составляющие, механические показатели и характеристики фазовых превращений валкового чугуна.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты исследований по воздействию бора на фазовый состав чугуна рабочего слоя валков ЛПХНМд-71 И (Ц).

2. Результаты исследований по влиянию бора на микроструктуру чугуна ЛПХНМд-71 И (Ц).

3. Результаты исследований по воздействию бора на характеристики фазовых превращений чугуна ЛПХНМд-71 И (Ц), происходящих при нагреве.

4. Результаты исследований по влиянию бора на твёрдость и микротвёрдость структурных составляющих чугуна ЛПХНМд-71 И (Ц).

5. Рациональный химический состав чугуна ЛПХНМд-71И (Ц).

Достоверность и апробация результатов

Достоверность экспериментальных данных, выводов и рекомендаций основывается на использовании современных методов и методик исследования валкового чугуна и эффективности предложенного технологического решения по применению бора, подтвержденных результатами промышленных испытаний и внедрением в производство прокатных валков.

Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на: 67, 69, 70 и 71й научно-технических конференциях ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова», г. Магнитогорск, 2009, 2010, 2012, 2013 гг.; международной научно-технической конференции молодых специалистов ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», г. Магнитогорск, 2011; XV научно-технической конференции молодых специалистов ЗАО «Механоремонтный комплекс», г. Магнитогорск, 2011.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 7 научных статей, из них 4 - в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ.

Личный вклад автора. Автору принадлежит научная постановка задач исследования, проведение опытных плавов, исследование технологического процесса получения чугуна рабочего слоя двухслойных индифинитных валков с определением рационального количества бора, изучение микроструктуры и механических свойств валкового чугуна до и после введения бора, обработка и анализ полученных результатов, формулирование выводов.

Все представленные в работе экспериментальные результаты получены автором самостоятельно. При этом автор проводил исследования в лабораторных и промышленных условиях, разрабатывал методы и методики исследования.

Соответствие диссертации паспорту специальности. Диссертационная работа по своим целям, задачам, содержанию, методам исследования и научной новизне соответствует пункту 3 «Исследование обычных, наномодифицирующих, электрических, магнитных, механических и других видов обработки на свойства расплавов, отливок и литейных форм» и пункту 11 «Ресурсосбережение в литейном производстве» паспорта специальности 05.16.04 – Литейное производство (технические науки).

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы из 132 наименований. Текст диссертационной работы изложен на 133 страницах машинописного текста, иллюстрирован 41 рисунками, 19 таблицами.

2. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, показаны научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе проведён обзор отечественной и зарубежной литературы, проанализированы основные факторы, снижающие эксплуатационных свойств прокатных валков, и основные валковые дефекты, возникающие при прокатке.

Выявлено, что главным фактором, влияющим на стойкость валков, является абразивный износ, а самый большой процент выхода из строя валков происходит по причине возникновения дефектов в рабочем слое валка (выкрошки, трещины, отслоения, отколы и пр.).

В связи с этим определено, что решающее влияние на конечную стойкость валка имеет износостойкость его рабочего слоя, которую можно повысить несколькими способами: изменение химического состава, термическая обработка и пр. Самый простой и надежный способ среди них – это легирование новым химическим элементом.

Многие специалисты литейного производства непрерывно занимаются исследованиями в области повышения эксплуатационных свойств валков за счёт введения в их рабочий слой новых лигатур, однако уже найденные элементы либо не повышают рабочие характеристики поверхностного слоя до требуемого уровня, либо увеличивают стоимость валка.

На основе изучения состояния вопроса сделаны выводы, поставлены цель и задачи исследования.

Во второй главе изложены методики и кратко описано оборудование для проведения исследований. Объектом исследования является валковый чугун, из которого изготавливается рабочий слой чугуновых центробежно-литых листопркатных валков исполнения ЛПХНМд-71 И (Ц).

Выплавку валкового чугуна осуществляли в индукционной печи ИСТ-006 с основной футеровкой и заливали в сухие и сырые песчано-глинистые формы (ПГФ) и кокиль.

Металлографические исследования микроструктуры опытных образцов проводили на микроскопе Olympus GX с программой работы с изображениями – специализированной электронной таблицей SIAMS Photolab.

Твердость опытных образцов определяли на твердомере GALILEO COMP 25, количество замеров твёрдости составляло не менее трех. Микротвердость опытных образцов измеряли на твердомере МН-3.

Определение фазового состава образцов проводили на рентгеновском дифрактометре фирмы «BRUKER AXS GmbH» модели «Advance D8», исследование фазовых превращений испытуемого чугуна осуществляли термическим методом на синхронном термоаналитическом приборе STA (Jupiter 449 F3) фирмы «NETZSCH».

В третьей главе исследовали существующий индифинитный чугун для валков исполнения ЛПХНМд-71 И (Ц): химический состав, микроструктуру и механические свойства, а также формирования рабочего слоя во время центробежной заливки⁴ определили факторы, влияющие на затвердевание рабочего слоя валков: ширину газозащитного зазора между отливкой и формой, толщину рабочего слоя, среднюю скорость затвердевания металла рабочего слоя от температуры заливаемого металла; определили необходимый перегрев металла рабочего слоя для формирования нормального технологического процесса получения годного вала.

Провели анализ микроструктуры и механических свойств чугуна рабочего слоя валков исполнения ЛПХНМд-71 И (Ц), работающих в условиях высоких температур и испытывающих воздействие абразива. Химический состав валкового чугуна представлен в табл. 1, механические свойства – табл. 2.

Таблица 1

Химический состав исследуемого валкового чугуна

Химический состав							
C	Si	Mn	S ≤	P ≤	Cr	Ni	Mo
2,8-3,6	0,3-0,8	0,5-1,2	0,1	0,15	1,5-2,2	3,8-4,9	0,3-0,7

Таблица 2

Механические свойства исследуемого валкового чугуна

Уд. вяз- кость, Дж/см ²	Твердость, HRC	Предел теку- чести σ_T , МПа	Вр. сопро- тивление σ_B , МПа	Отн. удлине- ние δ , %	Отн. сужение ψ , %
3,65	51	74	396,5	1,6	0,4

Изучили микроструктуру рабочего слоя десяти листопрокатных валков исполнения ЛПХНМд-7 (И) Ц, одна из которых показана на рис. 1. Установили,

что микроструктура валкового чугуна представляет собой мартенсито-бейнитную матрицу с одновременным наличием в ней как карбидной составляющей, так и мелких включений графита.



Рисунок 1 - Микроструктура чугуна рабочего слоя валка ЛПХНМд-7 И(Ц):
а – металлическая матрица, б – графит

Определили, что металлическая основа чугуна имеет следующие характеристики: Мартенсит (М) – 7...10 балл, бейнит (Б) - 2, 3 балл, процентное содержание графита составляет 1,9...4,5 % (в зависимости от глубины измерения от поверхности рабочего слоя), формы графита: вермикулярная: ВГф2 и ВГф3, ВГр2, ВГ70...92 и пластинчатая: ПГф1, ПГр1, ПГд90...180, ПГ2...4. Преобладающая формы графита – вермикулярная, что не обеспечивает изучаемому валковому чугуна надлежащей прочности, распределение графитных включений - неравномерное, что снижает износостойкость чугуна.

Изучив и проанализировав износостойкость indefinitных листопркатных валков ЛПХНМд-71 И (Ц) за период 2005...2008 гг. (рис. 2), определили, что она ниже износостойкости аналогичных зарубежных валков.

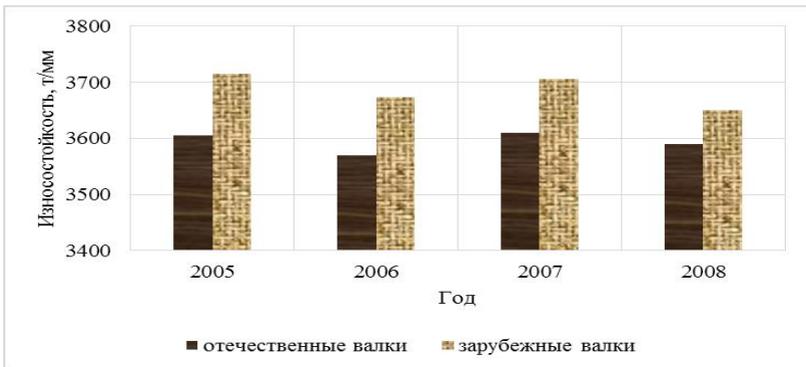


Рисунок 2 - Средняя износостойкость indefinitных валков

Определили рациональный химический валкового чугуна, приведенный в табл. 3.

Таблица 3

Рациональный химический состав валкового чугуна рабочего слоя
валка исполнения ЛПХНМд-71 И(Ц)

Содержание химических элементов, %							
C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo
3,13	0,71	0,83	0,016	0,049	1,69	4,65	0,43

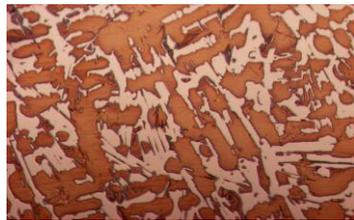
В четвертой главе изложены результаты комплексного исследования валкового чугуна ЛПХНМд-71 И (Ц) после введения бора.

Исследовали образующиеся соединения бора в изучаемом валковом чугуне. Для этого провели его выплавку с добавлением бора (0,091 %, 0,062 % и 0,057 %) и осуществили анализ его фазового состава. Опытные образцы заливали в ПГФ.

Микроструктура опытных образцов - аустенитная металлическая матрица с небольшим количеством игл мартенсита (до 3%) и цементит (Ц40; Цп-6000), показана на рис. 3. Диаграммы фазового состояния опытных образцов представлены на рис. 4.



а



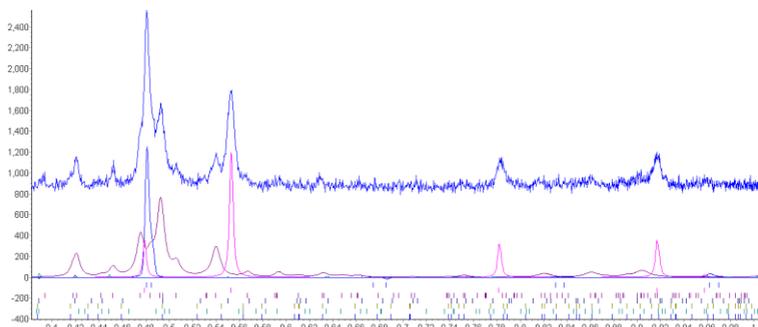
б



в

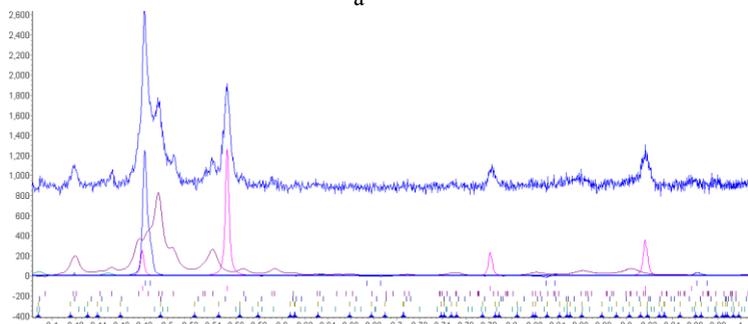
Рисунок 3 - Микроструктура опытных образцов чугуна:

а – с содержанием бора – 0,091 %, б – тоже 0,062 %, в – тоже 0,057 %



Alpha Iron tetra – 6,54 %; Iron gamma Austenite - 52,83 %; Cementite Fe_3C – 30,51 %
 B_{10}C - 0,00016 %; B_4C - 0,00032 %; B_{13}C_2 - 0,00009 %; Fe_3B - 0,0028 %

а



Alpha Iron tetra – 6,96 %; Iron gamma Austenite - 56,86 %; Cementite Fe_3C – 35,98 %
 B_{10}C - 0,00012 %; B_4C - 0,00031 %; B_{13}C_2 - 0,00013 %; Fe_3B - 0,0025 %

б

Рисунок 4 - Диаграммы фазового состояния опытных образцов чугуна:
 а - с содержанием бора 0,062 %; б – тоже 0,057 %

Выявили бориды железа Fe_3B , хотя М. Г. Крукович, Б. А. Прусаков и И. Г. Сизов в работе «Пластичность борированных слоев. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010» описывают существование четырех типов боридов железа: Fe_3B , Fe_2B , FeB и FeB_2 , которые могут образовываться в Fe-C сплавах. Температурные диапазоны образования Fe_2B , FeB , FeB_2 и Fe_3B : 1389...1407 °С, 1540...1652 °С, 2070±50 °С и 1150...1250 °С соответственно, а поскольку температура плавления опытных образцов валкового чугуна (1250 °С) меньше температур, при которых образуются Fe_2B , FeB , FeB_2 , то в нём при введении бора образуется только борид железа Fe_3B .

Выявили карбиды бора типов B_4C , B_{10}C и B_{13}C_2 , элементарные частички атомов которых представлены на рис. 5.

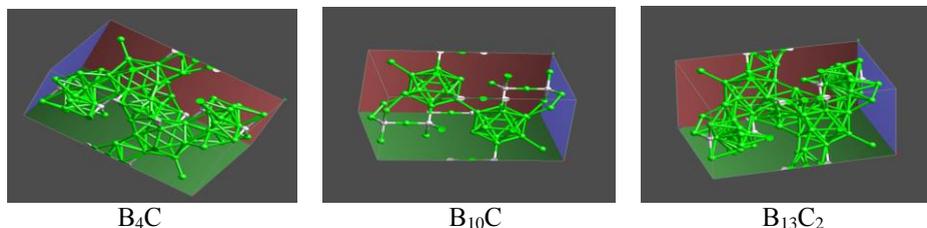


Рисунок 5 - Элементарные ячейки строения карбидов бора

Изучили характер воздействия бора на структурные составляющие и механические свойства исследуемого валкового чугуна. Проведены экспериментальные плавки с различными добавками бора. Заливку опытных образцов производили в сухую и сырую ПГФ и кокиль. Содержание бора в опытных плавках находилось в интервале, %: 0,01...0,09. Химический состав полученных опытных образцов представлен в табл. 4.

Таблица 4

Химический состав опытных образцов валкового чугуна

№ плавки	Содержание химических элементов, %								
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	B
1	3,12	0,70	0,82	0,017	0,050	1,70	4,67	0,45	-
2	3,14	0,69	0,85	0,016	0,050	1,72	4,66	0,43	0,012
3	3,13	0,72	0,84	0,015	0,049	1,69	4,65	0,42	0,021
4	3,14	0,72	0,83	0,014	0,051	1,71	4,67	0,44	0,033
5	3,15	0,69	0,85	0,016	0,052	1,70	4,66	0,45	0,042
6	3,13	0,71	0,84	0,014	0,051	1,72	4,68	0,43	0,051
7	3,12	0,72	0,83	0,015	0,049	1,68	4,67	0,44	0,064
8	3,12	0,72	0,83	0,018	0,052	1,71	4,63	0,42	0,072
9	3,15	0,70	0,84	0,017	0,046	1,69	4,66	0,42	0,083
10	3,12	0,71	0,82	0,015	0,051	1,70	4,67	0,43	0,091

Микроструктура опытных образцов валкового чугуна (с бором и без бора), залитых в сухую ПГФ, представляет собой: А + М (2-10 %, 3...7 балл) и Ц (Ц40; Цп-13000). В опытном образце чугуна без бора (плавка № 1) и в структуре опытных образцов с бором плавки № 4...10 (рис. 6 а) найден пластинчатый графит (ПГф1, ПГд25, Пгр2, ПГ2). В опытных образцах плавки № 2 и № 3 выявлен графит шаровидной формы ШГф3, ШГф4, ШГд25, ШГр1, ШГ2 (рис. 6 б).

Микроструктура опытного чугуна, залитого в сырую ПГФ, представляет собой: М (35-60 %, 5...8 балл) + Аост и Ц (Ц23, Цп13000-20000). В опытном образце чугуна без бора (плавка № 1) и в структуре опытных образцов с бором плавки № 2...4, № 6, № 8 и № 9 (рис. 7 а) найден пластинчатый графит (ПГф1,

ПГд25, Пгр2, ПГ2) Однако в опытных образцах плавок № 5, № 7 и № 10 выявлен графит шаровидной формы ШГф3, ШГф4, ШГд25, ШГр1, ШГ2 (рис. 7 б).

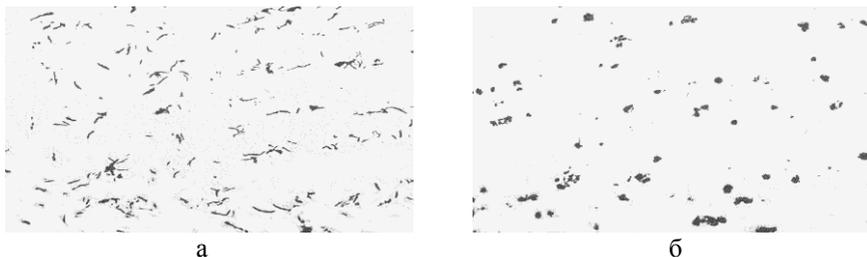


Рисунок 6 - Графит опытных образцов валкового чугуна (x50), залитых в сухую ПГФ, с содержанием бора:
 $a - <0,001 \%$, $b - 0,021 \%$

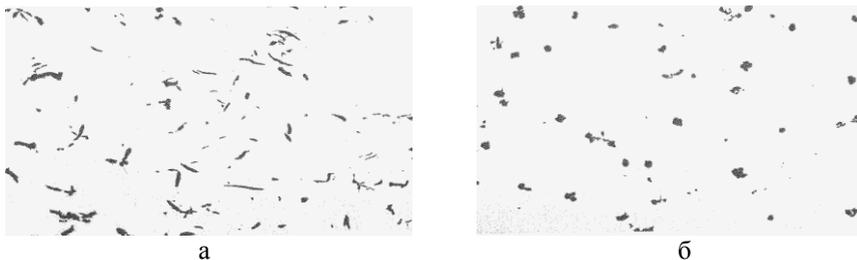


Рисунок 7 - Графит опытных образцов валкового чугуна (x50), залитых в сырую ПГФ, с содержанием бора:
 $a - <0,001 \%$, $b - 0,042 \%$

Установили, что бор способствует образованию в валковом чугуне ЛПХНМд-71 И (Ц) шаровидной формы графита с равномерным распределением.

Микроструктура микролегированных бором опытных образцов валкового чугуна, залитых в стальной кокиль, представлена на рис. 8.

Микроструктура опытного чугуна, залитого в кокиль, представляет собой Б+ М (15...25 %) и Ц (Ц33; Цп13000-25000). Графит в опытных образцах не обнаружен. При различном содержании бора в опытных образцах валкового чугуна выявили изменение балла его металлической матрицы (рис. 9).

График зависимости балла мартенсита изучаемого валкового чугуна от содержания в нем бора разделяется на два участка:

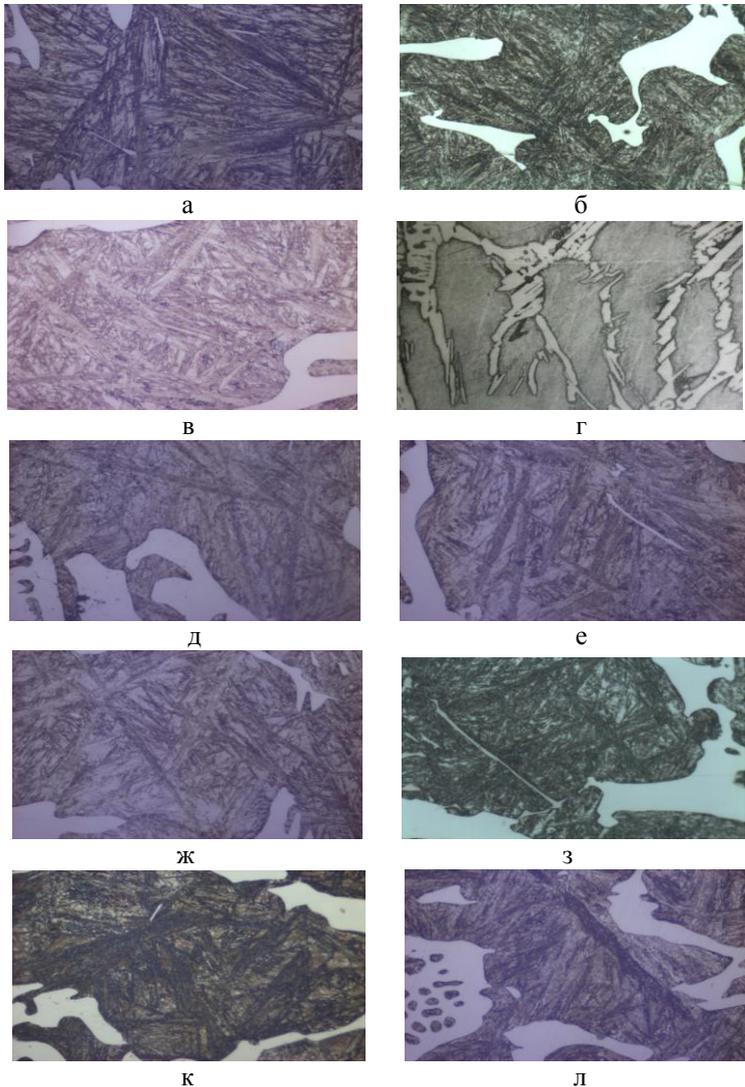
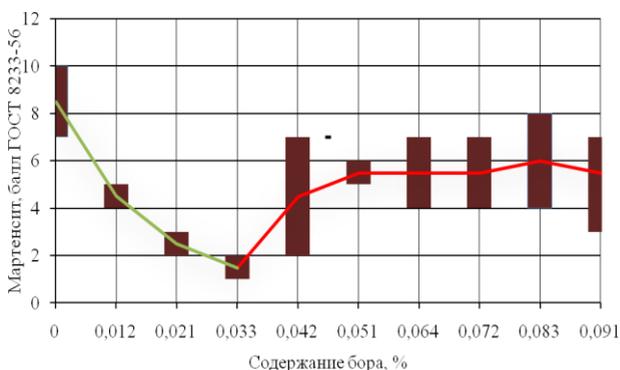


Рисунок 8 - Микроструктура опытных образцов валкового чугуна ($\times 1000$), залитого в стальной кокиль, с содержанием бора:
а – $<0,001\%$, б – $0,012\%$, в – $0,021\%$, г – $0,033\%$, д – $0,042\%$, е – $0,051\%$,
ж – $0,064\%$, з – $0,072\%$, к – $0,083\%$, л – $0,091\%$



Содержание бора в опытных образцах валкового чугуна	Мартенсит, балл ГОСТ 8233-56
-	7-10
0,01	5
0,02	2-3
0,03	1-2
0,04	2-7
0,05	5-6
0,06	4-7
0,07	4-7
0,08	4-8
0,09	3-7

Рисунок 9- График зависимости балла мартенсита от содержания бора

- на первом участке (0,01...0,03% бора) выявили снижение балла мартенсита с 5 до 1, 2 балла;

- на втором участке (0,04...0,09 % бора) определили два последовательных эффекта: сначала игла мартенсита увеличивается до среднего 5-6 балла (0,04...0,05 % бора), затем остается примерно на том же уровне (0,05...0,09 % бора).

Несмотря на повышение балла мартенсита на участке, начинающееся с содержания бора 0,04 %, балл мартенсита на этом участке ниже, чем в образцах валкового чугуна без бора.

Определили, что в результате введения бора 0,03 % в валковый чугун происходит уменьшение иглы мартенсита с 7...10 до 1, 2 балла.

Выявили, что самая маленькая игла мартенсита (1, 2 балл по ГОСТ 8233) достигается за счёт введения бора 0,033 %.

Установили, что при увеличении содержания бора в опытных образцах валкового чугуна в пределах 0,01...0,09 % его твердость и микротвердость структурных составляющих повышаются. Изменение твердости валкового чугуна и микротвердости его структурных составляющих при различных модифицирующих добавках бора в нем представлено на рис. 10 - 12.

Изучили влияния бора на кинетику распада мартенсита и характеристики остальных фазовых превращений, происходящих в валковом чугуне при нагреве. Исследование проводили калориметрическим (ДСК) методом в два этапа: первый этап на образцах без термообработки, второй – после термообработки.

На первом этапе исследовали опытные образцы валкового чугуна без термообработки до и после введения бора (0,031% и 0,093 %). Микроструктура образцов: аустенит с началом образование игл мартенсита (5...8 %). На всех кривых

изменения массы (ТГ) и величины теплового потока (ДСК) исследуемых образцов наблюдается три термических эффекта.

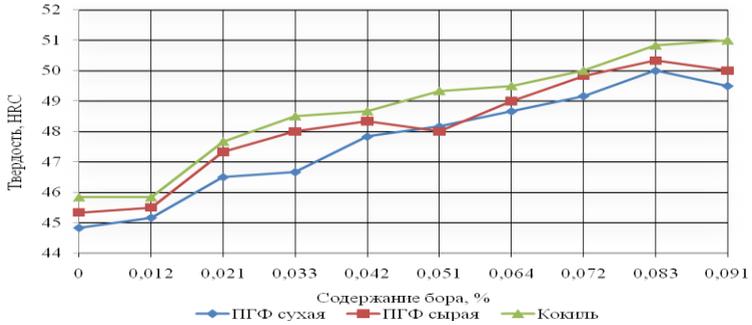


Рисунок 10 - Влияние бора на твердость опытных образцов валкового чугуна

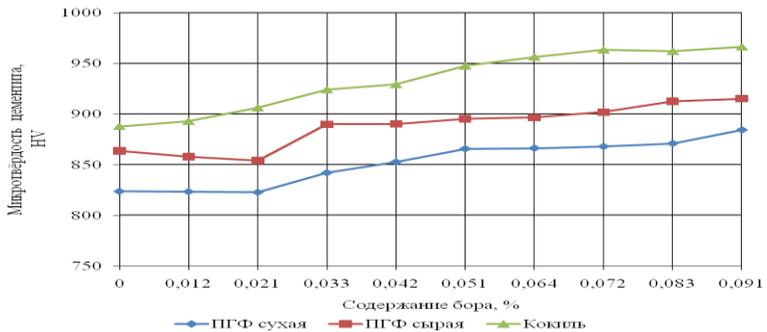


Рисунок 11 - Влияние бора на микротвердость цементита опытных образцов валкового чугуна

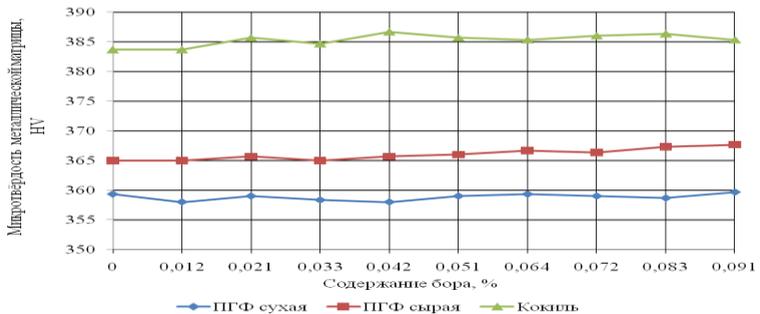


Рисунок 12 - Влияние бора на микротвердость металлической матрицы опытных образцов валкового чугуна

Экзотермический эффект в районе температур 400...500 °С соответствует распаду мартенсита на феррито-цементитную смесь. Первый эндотермический эффект в районе температур 700...770 °С соответствует превращению феррито-цементитной смеси в аустенит, второй – распаду (диссоциации) цементита (1100...1200 °С). Установили, что с увеличением содержания бора скорость распада цементита повышается: для образца без бора она составляет 0,4 г/ч, для чугуна с содержанием бора 0,031 % - 0,5 г/ч, а для чугуна с содержанием бора 0,093 % - 0,65 г/ч.

На втором этапе исследовали опытные образцы валкового чугуна с содержанием бора 0,076 % до и после термообработки.

На ДСК-кривых опытных образцов чугуна до и после термообработки выявили термические эффекты практически на одинаковых температурах: экзотермический, соответствующий распаду мартенсита на феррит и карбиды (для нетермообработанного образца при температурах 398...502 °С, термообработанного образца - 417...489 °С) и эндотермический, соответствующий превращению феррито-цементитной смеси в аустенит (для нетермообработанного образца при 700...830 °С, термообработанного - 670...765 °С). На ДСК-кривой нетермообработанного образца выявили экзотермический эффект (при 210...320 °С, соответствующий превращению остаточного аустенита в бейнит), не найденный на ДСК-кривой термообработанного образца.

Установили, что термообработку чугуна рабочего слоя валков исполнения ЛПХНМд-71 И (Ц) следует проводить при температуре не выше 398 °С, поскольку в интервале 398...502 °С происходит распад мартенсита его металлической матрицы, что может привести к ухудшению структуры и образованию трещин напряжений в поверхностном слое валка.

Провели низкотемпературный отпуск изучаемого валкового чугуна при температуре 390 °С, термограмма которого приведена на рис. 15 б.

В пятой главе представлены показатели стойкости исследуемых валков за период 2009...2011 гг., в который часть валков изготавливалась с добавлением бора в рабочий слой.

Проведён сравнительный анализ износостойкости (т/мм) отработавших по износу валков с бором и без. Установлено, что средняя износостойкость валков, чей рабочий слой был микролегирован бором, выше, чем тех, которые микролегированы не были.

Заключение

1. Проанализирована технология производства центробежно-литых валков исполнения ЛПХНМд-71 И (Ц) и установлено, что она не обеспечивает формирование такой микроструктуры рабочего слоя, которая необходима для получения повышенной износостойкости валков.

2. Изучено влияние химических элементов на микроструктуру и износостойкость чугуна рабочего слоя прокатных валков и определено, что уже входящие в химический состав элементы не способствуют образованию шаровидной

формы и равномерному распределению графита и получению пониженного балла металлической основы чугуна.

3. По результатам исследований установлено, что при микролегировании бором происходят положительные изменения в микроструктуре и твердости чугуна рабочего слоя индифинитных валков с повышением показателей их стойкости.

4. Экспериментально установлено, что при введении бора в валковый чугун ЛПХНМд-71 И (Ц) образуется графит шаровидной формы (ШГф3, ШГф4, ШГд25, ШГр1, ШГ2), способствующий повышению прочности и износостойкости чугуна.

5. По результатам эксперимента выявлено, что максимальное снижение балла мартенсита металлической матрицы изучаемого валкового чугуна происходит при содержании бора в чугуне – 0,033 %. Достигается 1-2 балл (ГОСТ 8233).

6. Экспериментально установлено, что при повышении бора в валковом индифинитном чугуне ЛПХНМд-71 И (Ц) в диапазоне 0,01...009 % твердость чугуна и микротвердость его структурных составляющих повышается.

7. Экспериментально установлено, что при повышении содержания бора в валковом чугуне ЛПХНМд-71 И (Ц) происходит повышение скорости распада цемента и понижение величин температурных максимумов протекающих фазовых превращений.

8. По результатам эксперимента определено, что при введении бора в валковый чугун ЛПХНМд-71 И (Ц) он образует с железом химические соединения – бориды типа Fe_3B , а с углеродом химические соединения – карбиды типов V_4C , $V_{10}C$ и $V_{13}C_2$.

9. Разработаны рекомендации по температурному режиму термической обработки исследуемых чугуновых листопрокатных валков - рациональные температуры проведения отпуска 398...417 °С.

10. В результате внедрения предложенного легирующего элемента бора в технологический процесс производства валков исполнения ЛПХНМд-71 И (Ц) в условиях МЗПВ, установлено, что их стойкость в условиях ММК в ЛПЦ-10 на ШСГП «2000» в клетях № 11-13 увеличилась на 4,5...5 % с экономическим эффектом 1 300 000,0 руб./год.

Основные результаты работ представлены в публикациях:

1. Вдовин К. Н., Зайцева А. А. Влияние бора на твердость валкового чугуна // Межрег. Сб. науч. тр. – Теория и технология металлургического производства. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2009, № 9. С. 133-136.

2. С. В. Цыбров, К. Н. Вдовин, А. А. Зайцева Выбор легирующих элементов для формирования структуры рабочего слоя чугуновых валков // Четвертый международный промышленный форум «Реконструкция промышленных предприятий – прорывные технологии в металлургии и машиностроении»: сб. док. конф. «Инновационные технологии в обеспечении качества, энергоэффективности и экологической безопасности металлургических и машиностроительных

предприятий в современных условиях». Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова, 2011. 188 с.

3. Вдовин К. Н., Зайцева А. А. Влияние термической обработки на валковый чугун, модифицированный бором // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2011. № 4 (36). С. 13-15.

4. К. Н. Вдовин, А. А. Зайцева Фазовый состав валкового чугуна, модифицированного бором литья // Литейщик России. 2011. № 11. С. 25-27.

5. С. В. Цыбров, К. Н. Вдовин, А. А. Зайцева Повышение эксплуатационных характеристик индефинитных валков центробежного литья // Литейщик России. 2012. № 3. С. 30-32.

6. К. Н. Вдовин, К. Г. Пивоварова, А. А. Зайцева Исследование структурных превращений в отбеленном чугуне при отпуске методом термического анализа // Литейщик России. 2014. № 2. С. 43-45.

7. Факторы, влияющие на формирование рабочего слоя листового прокатного валка / К.Н. Вдовин, А.А. Зайцева, А.Н. Феоктистов, М.В. Антонов // Механическое оборудование металлургических заводов: Междунар. сб. науч. тр. / под ред. Корчунова А.Г. Вып. 3. - Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. тех. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. с.