

ПОПОВ Дмитрий Анатольевич

**СОЗДАНИЕ АУСТЕНИТНОГО ЧУГУНА С ЗАДАННЫМ
УРОВНЕМ МЕХАНИЧЕСКИХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ДЛЯ
ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА ФРИКЦИОННЫХ
ПАР СУХОГО ТРЕНИЯ**

05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Курск – 2009

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Воронежская государственная лесотехническая академия» на кафедре «Производство, ремонт и эксплуатация машин».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Станчев Дмитрий Иванович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Осинцев Александр Николаевич

кандидат технических наук, доцент
Тригуб Владимир Борисович

Ведущая организация: ООО «Автобан-Липецк» г. Липецк.

Защита состоится «11» марта 2009 г. в 13⁰⁰ часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.105.01 при Курском государственном техническом университете по адресу: 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Курского государственного технического университета.

Автореферат разослан « » февраля 2009г.

Ученый секретарь
совета по защите докторских
и кандидатских диссертаций

О.Г. Локтионова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одним из возможных путей повышения эффективности работы машин и снижения эксплуатационных затрат является увеличение ресурса быстроизнашивающихся деталей пар трения. К числу таких узлов можно отнести фрикционные пары автомобильного и железнодорожного транспорта, подъемно-транспортных машин (ПТМ) и механизмов, обеспечивающие передачу тормозного или крутящего момента.

В частности, для изготовления металлических тормозных колодок локомотивов используется серый фосфористый чугун ГОСТ 30249-97, структура которого состоит преимущественно из перлита (Пт1, Пт2), графита (ПГф1, ПГф3), фосфидной эвтектики (ФЭЗ, ФЭ4) и цементита (Ц2, Ц4). По сведениям ДЭПО юго-восточной железной дороги известно, что колодки из фосфористого чугуна характеризуются недостаточной износостойкостью. К примеру, отмечено, что на двойном плече Москва-Минск колодки изнашиваются до предельного размера и подвергаются замене, при этом в результате износа истирается 160 кг серого чугуна, применительно к одному вагону (пассажирский состав). Учитывая масштабы отрасли, можно утверждать, что убытки, вызванные малым ресурсом колодок, и простоями по их замене приводят к существенному повышению эксплуатационных расходов. Кроме того, колодки из фосфористого чугуна вызывают повышенный износ и повреждение сопряженного с ними колеса, что, по мнению ряда исследователей, обусловлено воздействием фосфидной эвтектики и цементита, которые по мере истирания перлита оказываются в зоне фрикционного контакта.

Подобная ситуация наблюдается при эксплуатации тормозных пар ПТМ, где металлический тормозной шкив транспортной тележки взаимодействует с фрикционной накладкой. По данным лесозаготовительных предприятий было установлено, что при интенсивной сезонной эксплуатации козловых кранов замена шкивов производится через 50...70 рабочих смен. Низкий ресурс шкивов вызывает необходимость их ремонта или замены, что приводит к увеличению эксплуатационных расходов. Для изготовления шкивов используют стали: 35Л, 40Х, 55Л, 30ХНЛМ по ГОСТ 977-88, с твердостью рабочей поверхности 35...45HRC; реже – чугуны не ниже марки СЧ 28-48 по ГОСТ 1412-85.

Как показывает практика, существует объективная необходимость совершенствования состава и свойств конструкционных материалов, в особенности тех, у которых структура является основным фактором, обеспечивающим эффективность и долговечность работы сопряженных деталей, в частности металлических деталей фрикционных пар сухого трения.

Настоящая работа посвящена созданию износостойкого аустенитного чугуна и исследованию его работоспособности в литом и термообработанном состояниях в условиях сухого трения для повышения ресурса тормозных колодок железнодорожного транспорта и тормозных шкивов ПТМ.

Диссертационная работа выполнена в рамках НИР Воронежской государственной лесотехнической академии по научному направлению кафедры производства, ремонта и эксплуатации машин «Совершенствование материалов, технологий производства, ремонта и эксплуатации машин (2006 ... 2010 гг.)».

Цель работы – повышение ресурса тормозных шкивом подъемно-транспортных машин и тормозных колодок железнодорожного транспорта путем создания износостойкого чугуна и исследование его работоспособности в условиях сухого трения.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

– провести анализ существующих материалов, традиционно применяемых для металлических деталей фрикционных пар сухого трения, а также технологических методов и приемов, способствующих повышению износостойкости тормозных шкивов ПТМ и тормозных колодок железнодорожного транспорта, оценить их преимущества и недостатки;

– разработать программный комплекс, позволяющий оптимизировать набор технологических методов и приемов, обеспечивающих получение заданного уровня механических и эксплуатационных свойств конструкционного чугуна, учитывая производственные возможности (сырьё, оснащение) предприятия, а также стоимость технологии;

– разработать химический состав и технологию получения аустенитного чугуна, исследовать влияние термической обработки на состояние его структуры и свойства при сухом трении;

– провести испытания на износ при сухом трении аустенитного чугуна в литом и термообработанном состоянии в сравнении с фосфористым чугуном и СЧ 28-48, сталью 40Х применяемыми, соответственно, для тормозных колодок железнодорожного транспорта и тормозных шкивов подъемно-транспортных машин;

– осуществить металлографические, рентгеноструктурные и электронномикроскопические исследования аустенитного чугуна в целях объяснения механизма его упрочнения и изнашивания при сухом трении;

– определить математические зависимости, устанавливающие связь между эксплуатационными, структурными параметрами марганцовистого чугуна и нагрузочно-скоростными факторами.

Объектом исследования является аустенитный чугун предложенного химического и структурного состава, работающий в условиях сухого трения, применительно к тормозным шкивам подъемно-транспортных машин и тормозным колодкам локомотива.

Методы исследования. Для достижения поставленной цели использовались теоретические и экспериментальные методы исследования. При изучении структуры материалов применяли металлографический, рентгеноструктурный и электронномикроскопический способы. Теоретические исследования выполнены с использованием методов математического планирования эксперимента. Экспериментальная проверка основных теоретических положений проводилась на модельных образцах с применением лабораторных машин, а также на натуральных образцах в условиях эксплуатации. Обработка результатов осуществлялась методами математической статистики при компьютерной поддержке.

Научная новизна.

1. Разработан износостойкий аустенитный чугун нового химического состава, позволяющий существенно повысить ресурс тормозных шкивов подъемно-транспортных машин и тормозных колодок железнодорожного транспорта.

2. Экспериментально изучено влияние закалки с различным временем выдержки при закалочной температуре на структуру и свойства аустенитного марганцовистого чугуна. Установлено, что закалка способствует аустенизации марганцовистого чугуна, измельчению его структурных составляющих и их более равномерному распределению в основе, при этом износостойкость чугуна при сухом трении возрастает.

3. Экспериментально установлено, что аустенитный чугун предложенного химического состава превосходит по износостойкости фосфористый перлитный чугун и сталь 40Х в 2,7 и 1,8 раза, соответственно. Износостойкость аустенитного чугуна, полученного закалкой, была несколько меньше литого состояния, но при этом он в 1,8 ... 2 раза меньше, чем фосфористый перлитный чугун изнашивал сопряженную с ним поверхность контртела.

4. Предложена математическая модель, устанавливающая связь между нагрузочно-скоростными режимами, параметрами структуры аустенитного чугуна и его эксплуатационными свойствами при работе в условиях сухого трения. Разработан алгоритм обработки базы данных, позволяющий выбрать наиболее рациональный набор технологических приемов, обеспечивающих получение заданного уровня эксплуатационных свойств чугуна.

Практическая значимость состоит в разработке износостойкого чугуна, применение которого позволяет существенно повысить ресурс тормозных шкивов ПТМ и колодок железнодорожного транспорта. По итогам сравнительных эксплуатационных испытаний тормозных шкивов, аустенитный марганцовистый чугун был принят к использованию на ОАО «Воронежавтодор» г. Воронеж.

Разработанный программный комплекс по результатам успешной апробации был внедрен в технологический процесс литейного предприятия ООО ПКФ «Флатер» г. Воронеж.

Результаты исследований были адаптированы и внедрены в учебный процесс ВГЛТА для студентов специальности «Автомобили и автомобильное хозяйство», а также могут быть рекомендованы научным работникам, технологам и аспирантам, занимающимся совершенствованием свойств конструкционных материалов.

Достоверность научных положений обеспечена корректной постановкой задач исследования, обоснованным объемом экспериментального материала, позитивными результатами лабораторных и эксплуатационных испытаний. Достоверность результатов работы подтверждается отсутствием противоречий с данными других исследователей.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на научных конференциях профессорско-преподавательского состава Воронежской государственной лесотехнической академии (2005 – 2008 гг.), II международной научно-практической конференции «Студент, специалист, профессионал ССП - 07» (Москва, 2007), Всероссийской научно-технической конференции «Приоритетные направления развития науки и технологий» (Тула, 2007); Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы развития лесного комплекса» (Вологда, 2007).

Личное участие автора состоит в проведении экспериментов по изучению влияния химического состава на структуру и свойства аустенитного чугуна; исследовании влияния термической обработки на фазовый состав и определении оптимальных режимов закалки, позволяющих получить заданные свойства аустенитного чугуна; разработке алгоритма программы, обеспечивающей совершенствование подхода при выборе технологических методов и приемов, способствующих получению заданных свойств чугуна; получении математической модели; проведении эксплуатационных испытаний; формулировке выводов.

Публикации. Основное содержание диссертации изложено в 12 печатных работах, в том числе в 8 статьях, 2 из которых – в издании, рекомендованном ВАК России, двух патентах на изобретение, двух свидетельствах о регистрации программы.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных результатов и выводов по работе, списка использованных источников и приложений. Общий объем работы составляет 177 страниц, из них 159 страниц основного текста и 18 страниц приложений. Работа включает 46 иллюстраций, 14 таблиц и 130 наименований использованных источников.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается обоснование актуальности темы, сформулированы цель исследования, научная новизна и положения, выносимые на защиту.

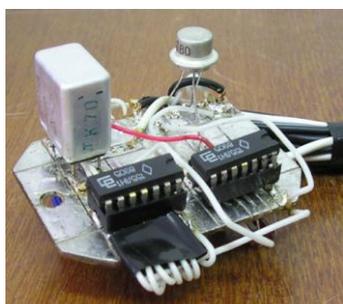
В первой главе представлен аналитический обзор отечественной и зарубежной литературы по металлведению и термической обработке сталей и чугунов, используемых для фрикционных муфт и тормозов автомобильного и железнодорожного транспорта, подъемно-транспортных машин и механизмов. Произведен анализ причин их простоя во внеплановых ремонтах. Установлено, что низкая работоспособность тормозных колодок и тормозных шкивов ПТМ обусловлена чрезмерным их износом. Из литературных источников известно, что исследованиями структуры и свойств различных металлов и сплавов занимались Н.А. Буше, А.В. Волощенко, Д.И. Станчев, П.С. Нартов, В.Н. Виноградов, Г.М. Солдатов и др. В этих работах отмечалось, что сплавы аустенитного класса обладают ценными качествами в условиях ударного, абразивного и других видов изнашивания, а именно, способностью самоупрочняться в процессе работы от действия внешних нагрузок. Это подтверждено успешным практическим применением аустенитных сталей для рабочих органов горнообогатительного оборудования, крестовин железнодорожных рельс, траков гусеничных тракторов и т.п.

Таким образом, актуальной является задача создания износостойкого аустенитного чугуна и исследования его работоспособности в условиях сухого трения с целью повышения ресурса тормозных шкивов ПТМ и тормозных колодок железнодорожного транспорта.

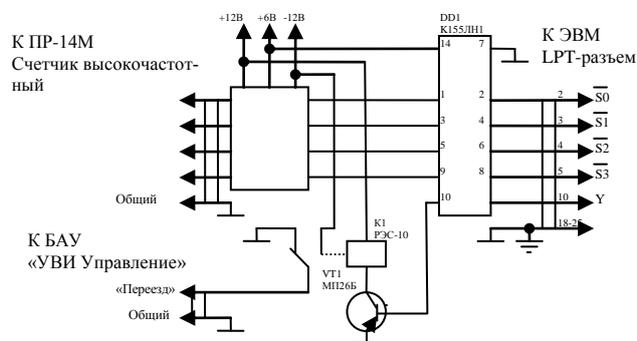
Из анализа состояния вопроса были определены цель и задачи исследования.

Во второй главе представлена методика исследования структуры и фазового состава, а также механических и эксплуатационных испытаний аустенитного чугуна в сравнении с традиционно применяемыми металлическими материалами.

Изучение физико-механических свойств металлов, в том числе, измерение твердости производили по методу Бринелля (ГОСТ 9012-59), Роквелла на приборе ТК-2М (ГОСТ 9013-59) по шкале "В и С". Микротвердость структурных составляющих материалов определяли на приборе ПМТ-3 (ГОСТ 10717-75). Микроструктура чугунов изучалась при помощи металлографического микроскопа МИМ-7. Рентгенографирование проводили на дифрактометре ДРОН-2, анализ структуры излома металлов осуществлялся на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ). Для оптимизации расчета и анализа рентгенограмм, нами было произведено совмещение работы дифрактометра ДРОН-2 с ЭВМ. Для чего был разработан специальный прибор-контроллер (рис. 1).



а)



б)

Рис. 1. Контроллер ДРОН-2 – LPT IBM:
а – плата в сборе; б – схема электрическая принципиальная.

Контроллер позволяет управлять перемещением детектора и считывать измеренное значение интенсивности рентгеновского излучения на каждом шаге сканирования в дискретном режиме работы дифрактометра и передавать его на ЭВМ. Обработка информации, полученной от контроллера, производилась операционной системой MS DOS. Для управления контроллером была разработана программа-драйвер D2S.exe в среде программирования Turbo Pascal 7.0.

Лабораторные испытания на износ проводились на машине СМЦ-2 по известной схеме трения «колодка-ролик». Применительно к тормозам локомотива колодки из экспериментального аустенитного и фосфористого чугунов изнашивались о стальной ролик 50Г2, закаленный ТВЧ (52...54 HRC); применительно к тормозам ПТМ ролики из экспериментального аустенитного и эталонного (СЧ 28-48) чугунов и стали (40Х) взаимодействовали с колодкой из асбобакелитового фрикционного материала ЭМ1.

В третьей главе предложен новый принцип, позволяющий обеспечить получение заданного набора механических и эксплуатационных свойств конструкционных чугунов с учетом имеющегося на конкретном предприятии оборудования и стоимости технологического процесса. Для этого были разработаны алгоритмы, по ним написана программа, которая путем аналитической обработки созданной нами базы данных, подбирает технологические методы и приемы, обеспечивающие получение конструкционного чугуна с заданным уровнем эксплуатационных свойств. При работе с программным комплексом предусмотрены широкие возможности для составления задания на оптимизацию. Для каждого из выходных параметров, независимо, задается одно из нескольких возможных направлений оптимизации: максимизирование параметра, минимизирование параметра, приближение параметра к некоторому заданному значению (целевому значению), исключение параметра из участия в оптимизации.

Процесс оптимизации заключается в расчете критерия оптимизации для каждого технологического процесса (ТП), содержащегося в базе данных, и выборе ТП с наилучшим критерием. Критерий оптимизации представляется в виде линейной комбинации частных критериев оптимизации с некоторыми коэффициентами:

$$K = \sum_{i=1}^5 k_i \cdot d_i \cdot \text{sign}(F_i - F_{ci}) \left| \frac{F_i - F_{ci}}{F_{ai}} \right|^p$$

где i – индекс параметра F_i ; k_i – относительная важность фактора (задается по результатам экспертных оценок); d – направление оптимизации ($d = 1$ – максимизация фактора, $d = -1$ – минимизация).

Программный комплекс также позволяет прогнозировать результаты от реализации возможного ТП. Для этого осуществляется перебор известных технологических процессов и проверка: по скольким факторам отличается ТП от заданного. Одновременно, содержащиеся в базе данных ТП, группируются по количеству несовпадений: первую группу составляют полностью совпадающие ТП, вторую – отличающиеся только одним фактором и.т.д. Затем в каждой группе производится усреднение значений выходных параметров:

$$F_{ij}^{cp} = \frac{1}{N_j} \sum_{r=1}^{N_j} F_{ir},$$

где i – номер параметра; r – индекс перебора ТП в группе с числом несовпадений j ; N_j – количество ТП в группе с числом несовпадений j .

После этого производится окончательное усреднение и получение значения

прогнозируемого параметра:

$$F_i^{cp} = k_0 F_{i0}^{cp} + k_1 F_{i1}^{cp} + k_2 F_{i2}^{cp} + k_3 F_{i3}^{cp} + k_4 F_{i4}^{cp},$$

где k_0, k_1, k_2, k_3, k_4 , – коэффициенты учета несовпадений, задающие относительные вклады каждой из групп в параметр.

При этом должно выполняться условие: $\sum_{r=0}^4 k_r = 1$.

Для корректного прогнозирования коэффициенты должны убывать с увеличением индекса несовпадений, т. е. $k_0 > k_1 > k_2 > k_3 > k_4$, так как с увеличением количества несовпадений параметр F_i все сильнее отличается от истинного значения. Используемые нами далее коэффициенты были выбраны экспертным путем: $k_0 = 0,75, k_1 = 0,12, k_2 = 0,07, k_3 = 0,04, k_4 = 0,02$.

При тестировании программного комплекса было установлено, что он корректно работает в рамках изначально заложенных ограничений: количество факторов от 2 до 10; количество параметров от 2 до 10; количество уровней фактора от 1 до 10; количество технологических процессов от 2 до 200; количество символов в кратком названии факторов, параметров, уровней – до 3, а в полном – до 26.

В четвертой главе представлены результаты исследования влияния химического состава и термической обработки на структуру и эксплуатационные свойства аустенитного чугуна при сухом трении. В качестве аустенитообразующего элемента был выбран марганец. Это объясняется тем, что аустенит, полученный на основе марганца более износостоек, склонен к фазовым превращениям, чем при использовании никеля, кроме того, ферромарганец менее дефицитный и дорогой компонент. Выбор микролегирующих карбидообразующих и улучшающих компонентов был сделан исходя из анализа экспертных оценок о влиянии этих химических элементов на заданные свойства чугуна, а также из научных работ предшествующих исследователей.

Используя возможности программного комплекса, нами был определен набор технологических методов и приемов, обеспечивающих получение аустенитного марганцовистого чугуна заданного химического состава с учетом производственных возможностей литейного цеха 3-да им. Тельмана. Выплавка данного чугуна осуществлялась в индукционной печи ИСТ – 006 с основной футеровкой. В качестве шихтового материала и лигатуры использовались чушковый литейный чугун, металлический лом, катодная медь, ферросплавы молибдена, хрома, марганца и силикокальций. Размер кусков шихты составлял 5...10 мм, что обеспечивало их полное расплавление и усвоение жидким металлом. Для компенсации выгорания углерода в печь добавляли бой электродов. Литейные свойства марганцовистого чугуна были такими же, как и серого, отличие составляла величина усадки, которая компенсировалась установкой прибыли при получении отливок из марганцовистого чугуна. Легирование ферромарганцем производилось в печи вместе с основной металлической завалкой, а модифицирование карбидообразующими и рафинирующими компонентами ковшовым способом, что обеспечивало их полное усвоение с минимальным угаром.

В соответствии с поставленными задачами было исследовано влияние концентрации марганца в сплаве на фазовый состав и эксплуатационные свойства аустенитного чугуна. Для этого была произведена серия плавок при которых варьировалось только содержание марганца на четырех уровнях, состав остальных компонентов, условия и режим проведения выплавки были постоянными. Микроструктура, фазовый состав и свойства полученных чугунов, приведены в табл.1.

Таблица 1

Влияние концентрации марганца на структурный состав и механические свойства марганцовистого чугуна в литом состоянии

Содержание марганца, %	Микроструктура (шлиф травленный)	γ/α	Твердость НВ	Микротвердость, $10 \cdot \text{МПа}$		
				аустенит	мартенсит	карбиды
4,5	Аустенито-мартенситная смесь, мартенсит, карбиды средних и мелких размеров. Преобладает мартенсит. Крупный пластинчатый графит.	0,7	315-330	-	682-690	810-840
8,2	Аустенит, аустенито-мартенситная смесь, карбиды, мелкодисперсный графит. Преобладание аустенита	8,5	238-250	330-350	590-650	855-870
10,5	Аустенит, незначительное количество мартенсита, карбидная сетка, мелкодисперсный графит. Преобладание аустенита.	17,5	210-225	310-325	450-470	950-1050
12,3	Аустенит, значительное количество крупных карбидов, распределенных неравномерно, отдельные поля ледобурита	21	242-248	320-340	-	1080-1200

В результате исследования микроструктуры было отмечено, что с ростом содержания марганца в чугуне изменяется соотношение фазовых составляющих: увеличивается отношение гамма-фазы к альфа-фазе железа, возрастает количество карбидной фазы (Fe_3C , Mn_3C , Cr_3C_2) и уменьшается количество графита.

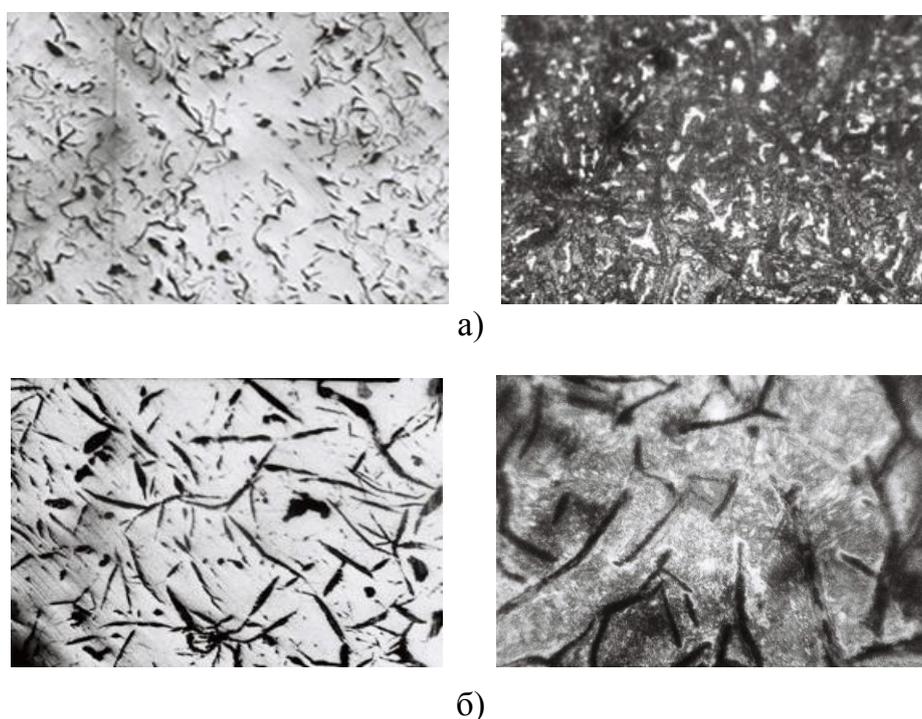


Рис.2. Шлифы марганцовистого и фосфористого чугунов: а – марганцовистый $\times 200$: до травления (слева), протравленный (справа); б – фосфористый $\times 200$: до травления (слева), протравленный (справа)

При этом наиболее оптимальным соотношением фазовых составляющих, а также их формой и расположением отличался сплав, содержащий 10,5%Mn. Его структуру составлял преимущественно аустенит, армированный средними и мелкими

по величине разнородными карбидами и мелкодисперсными графитными включениями (рис.2). Относительные испытания на износ при сухом трении, проведенные с образцами из чугунов с различной концентрацией марганца, показали, что марганцовистый чугун, содержащий 10,5 % Mn, в 2,2 раза превосходил по износостойкости чугун с 4,5 % Mn.

Увеличение содержания марганца свыше 10,5 % приводило к дальнейшему повышению количества аустенитной и карбидной фаз, но при этом карбиды наблюдались в виде отдельных полей, износостойкость чугуна не возрастала. На основании этого для дальнейших исследований и испытаний был выбран химический состав чугуна %: 3,7 C; 2,8 Si; 10,5 Mn; 0,8 Cr; 0,35 Cu; 0,75 Mo; 0,05 V; 0,03 S; 0,65 P; 0,1 Ca.

С целью изучения влияния термической обработки на структурный состав и свойства аустенитного марганцовистого чугуна, предложенного химического состава, образцы (колодки) подвергали закалке с температуры нагрева 1030...1050°С в воде.

На этапе предварительных испытаний было отмечено, что время выдержки аустенитного чугуна при температуре закалки оказывает существенное влияние на концентрацию, размер и расположение карбидной составляющей в чугуне. В связи с чем, исследовалась влияние времени выдержки, и проводился комплексный металлографический анализ образцов. В ходе проведенных исследований было установлено, что закалка марганцовистого чугуна приводила к практически полной аустенизации структуры (85...90%) и сопровождалась снижением твердости 160...170 НВ.

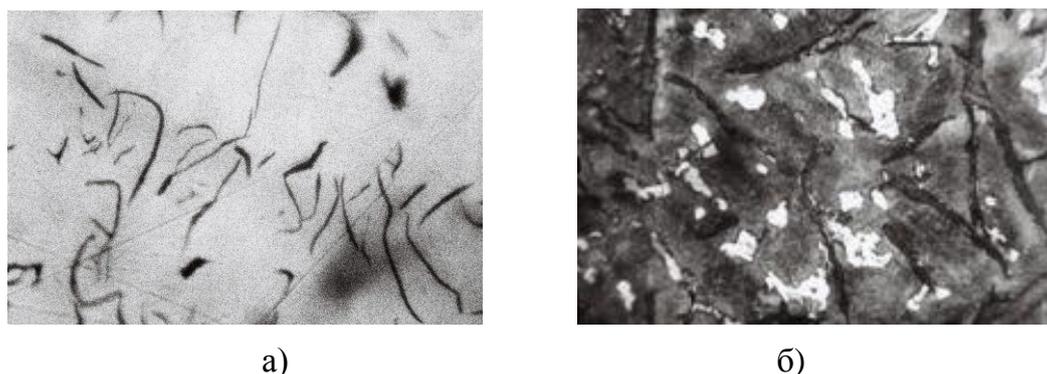


Рис. 3. Микроструктура марганцовистого чугуна в закаленном состоянии (при выдержке 2 часа): а – шлиф до травления $\times 500$; б – шлиф протравленный $\times 500$.

Таблица 2

Влияние термической обработки на структурный состав и свойства марганцовистого чугуна

Состояние чугуна	Время выдержки, ч	Карбиды			Графит			Ширина линий, мм		Микротвердость, $10 \cdot \text{МПа}$		
		V, %	$S_v, \text{мм}^2/\text{мм}^3$	$\Delta S, \text{мм}^2/\text{мм}^3$	V, %	$S_v, \text{мм}^2/\text{мм}^3$	$\Delta S, \text{мм}^2/\text{мм}^3$	γ (111)	α (110)	аустенита	мартенсита	карбидов
После литья	–	14,3	32,3	223,0	10,2	24,3	238,0	23,0	4,25	402	642	950
После закалки	0,5	1,4	4,03	278,8	9,5	16,2	170,6	13,7	–	332	–	820
	1	4,1	14,2	347,3	10,4	21,8	209,7	17,8	–	340	–	841
	2	3,5	12,8	365,4	13,2	32,6	246,7	18,0	–	344	–	1034
	3	3,7	13,6	608,3	6,4	21,0	320,6	20,2	–	368	–	1064
	4	3,3	11,1	256,0	10,4	21,8	209,7	16,3	–	320	–	1048

Увеличение времени выдержки с 0,5 ч до 2 ч вызывало измельчение карбидов и повышало их содержания в единице объема (табл. 2). Время выдержки свыше 2 ч. не вызывало существенных структурных изменений. Испытания на износ дали качественное подтверждение тому, что структурный состав чугуна, полученного закалкой, после 2-х часовой выдержки, обладает сравнительно высокой износостойкостью и оказывает слабое воздействие на сопряженную с ним поверхность контртела (сталь 50Г2). В связи с чем, для последующих лабораторных и эксплуатационных испытаний использовался марганцовистый чугун, закаленный после 2-х часовой выдержки при температуре закалки.

Сравнительные наблюдения фрактограмм поверхностей разрушения фосфористого перлитного и марганцовистого аустенитного чугунов с целью определения вида, характера взаимного расположения структурных составляющих показали, что структура аустенитного марганцовистого чугуна (рис.4, б) выгодно отличается от перлитной (рис.4, а). При рассмотрении поверхности изломов было замечено, что карбидные и графитные включения в перлитном чугуне разобщены, границы раздела их с металлической основой имели выраженный вид трещин, свидетельствовавший об отсутствии прочной связи между фазовыми составляющими, что при изнашивании является фактором, способствующим выходу карбидов на поверхность трения и их выкрашивание.

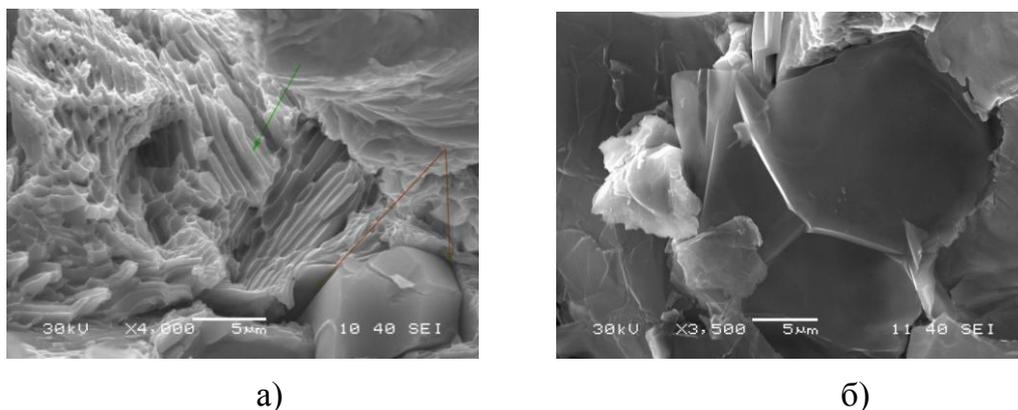


Рис. 4. СЭМ. Поверхности чугунов при различном увеличении: а – фосфористый перлитный; б – марганцовистый аустенитный;

В отличие от фосфористого чугуна, карбиды в марганцовистом чугуне имели вязкое расположение в металлической матрице, они были либо утоплены, либо частично затянуты аустенитом, при этом в структуре практически отсутствовали трещины, наблюдаемые в перлитном чугуне. Гетерогенная структура марганцовистого чугуна, основу которой составляет относительно вязкий аустенит, содержащий равномерно распределенные карбидные включения (рис. 2, а), несомненно, имеет сходство с композиционным составом фрикционных материалов. Такой состав чугуна в значительной степени удовлетворяет принципам формирования износостойкого материала, так как аустенит обладает способностью самоупрочняться в процессе трения, а армирующие его мелкодисперсные карбиды, выступая в роли опорной поверхности, воспринимают нагрузку и предотвращают интенсивное изнашивание металлической основы.

В пятой главе изложены результаты исследования работоспособности аустенитного марганцовистого чугуна в литом и термообработанном состоянии в условиях сухого трения. Результаты лабораторных и эксплуатационных испытаний позволили установить сравнительную износостойкость аустенитного марганцовистого чугуна и традиционных материалов, применяемых для деталей фрикционных пар, а также определить механизм упрочнения и изнашивания аустенитного чугуна при сухом трении.

Как видно из табл.3 наибольшей износостойкостью обладал аустенитный чугун в литом состоянии (ИАЧл), как в паре со сталью 50Г2, так и с фрикционным материалом ЭМ1. Износостойкость марганцовистого чугуна в закаленном состоянии (ИАЧз) была меньше литого (ИАЧл), но при этом колодки из него в 1,8 раза меньше изнашивали сопряженные с ними стальные ролики (52...54 HRC), имитирующие колесо локомотива. В паре с фрикционным материалов ЭМ1 износ ролика из аустенитного чугуна (ИАЧл) был в 2 раза меньше, чем ролика из стали 40Х.

Таблица 3

Результаты сравнительных испытаний на износ пары колодка-ролик

№	Материал		Относит. износ, ε		№	Материал		Относит. износ, ε	
	колодка	ролик	колодка	ролик		колодка	ролик	колодка	ролик
1	ИАЧл	50Г2	0,3	0,8	1	ЭМ1	ИАЧл	0,8	0,5
2	ИАЧз	50Г2	0,5	0,4	2	ЭМ1	ИАЧз	0,8	0,7
3	СЧФ	50Г2	1	1	3	ЭМ1	СЧ 28-48	0,7	0,8
	-	-	-	-	4	ЭМ1	40Х	1	1

Более высокая износостойкость аустенитного марганцовистого чугуна в сравнении с перлитным, объясняется интенсивным самоупрочнением рабочего слоя в процессе трения. Измерение микротвердости и рентгенографирование поверхности трения после каждого акта нагружения показали, что в ней происходит наклеп аустенита и превращение его в мартенсит деформации. При этом основное влияние на рост микротвердости оказывает величина удельного давления, скорость скольжения оказывает меньшее воздействие на структурные изменения – через фрикционный нагрев.

В процессе лабораторных испытаний производилось измерение семи параметров (I , $k_{тр}$, T , H_{μ} , J_{α}/J_{γ} , D и E) в зависимости от нагрузочно-скоростных факторов (v , p), в результате этого были определены уравнения регрессии типа ($f_i = f_i(p, v)$), доверительный интервал – 5%.

$$I = 16,295v - 1,636p + 3,022vp - 14,677v^2 + 0,207p^2;$$

$$k_{mp} = 0,37 - 0,153v - 0,013p + 2,623 \cdot 10^{-3}vp + 0,041v^2 + 5,168 \cdot 10^{-4}p^2;$$

$$T = -54,804 + 183,472v + 16,214p + 10,695vp - 82,117v^2 - 0,351p^2;$$

$$H_{\mu} = 539,742 - 38,41v + 37,187p - 2,575vp + 24,68v^2 - 0,994p^2;$$

$$J_{\alpha}/J_{\gamma} = -0,793v + 0,344p - 0,018vp + 0,414v^2 - 0,011p^2;$$

$$D = 3,683 - 0,747v - 0,16p + 0,044vp + 0,15v^2 + 5,135 \cdot 10^{-3}p^2;$$

$$E = 0,52v + 0,198p - 0,036vp - 6,41 \cdot 10^{-3}p^2$$

где, p – удельное давление, МПа; v – скорость скольжения, м/с; I – износ, мг; k – коэффициент трения; t – температура, °С; H_{μ} – микротвердость, МПа, J_{α}/J_{γ} - отношение интенсивностей фаз (мартенсита к аустениту); D – блочность, 10^{-5} м; E – микронапряжения второго рода.

Полученный объем экспериментальных данных позволил анализировать зависимости вида $f_1(f_2, f_3)$ или $f_1(f_2, f_3, f_4)$ – неявные связи. В рамках данной работы были определены уравнения типа $I(H_{\mu}, T)$ и $H_{\mu}(E, J_{\alpha}/J_{\gamma})$, связывающие износ с микротвердостью материала и фрикционным нагревом, а также более информативные тройные связи: $I(H_{\mu}, k, T)$ и $H_{\mu}(D, E, J_{\alpha}/J_{\gamma})$.

Неявные зависимости типа: $F_i = F_i(F_k, F_j \dots)$

$$I = 309,091 - 1,021H_{\mu} + 0,309T - 3,794 \cdot 10^{-4} H_{\mu} T + 8,195 \cdot 10^{-4} H_{\mu}^2 + 4,975 \cdot 10^{-4} T^2;$$

$$H_{\mu} = 547,17 - 113,61E + 220,69(J_{\alpha} / J_{\gamma}) + 53,18E(J_{\alpha} / J_{\gamma}) - 4,89E^2 - 40,871(J_{\alpha} / J_{\gamma})^2;$$

$$I = -2,714 - 75,381E + 96,529(J_{\alpha} / J_{\gamma}) - 20,566E(J_{\alpha} / J_{\gamma}) + 46,87E^2 - 19,739(J_{\alpha} / J_{\gamma})^2;$$

Результаты эксплуатационных испытаний тормозных шкивов транспортной тележки козлового крана на ОАО «Воронежавтодор» дали качественное подтверждение данных, полученных в лабораторных экспериментах. Тормозные шкивы, изготовленные из аустенитного марганцовистого чугуна, обладают более высокой износостойкостью по отношению к базовым материалам (40X, СЧ 28-48), традиционно используемым для таких деталей. Результаты эксплуатационных испытаний позволили определить экономического эффект (ЭЭ) от внедрения аустенитного марганцовистого чугуна.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Изучено влияние содержания марганца на фазовый состав и заданные свойства аустенитного чугуна и установлено, что содержание марганца 9,5...10,5% в чугуне обеспечивает формирование структурного состава, отличающегося наибольшей износостойкостью при сухом трении;

2. Исследовано влияние термической обработки (закалки), с различным временем выдержки при закалочной температуре, на структуру и свойства марганцовистого чугуна. Было установлено, что закалка приводит к практически полной его аустенизации (80...95%) и как следствие, существенному снижению твердости до 160...170 НВ. Увеличение времени выдержки вызывало измельчение карбидных и графитных составляющих, их более равномерное распределение в металлической матрице. Выдержка образцов в течение 2 часов при температуре закалки наиболее благоприятно влияет на соотношение фазового состава, размер, форму и распределение карбидных и графитных включений, что вызывает повышение его износостойкости при сухом трении.

3. Разработан программный комплекс, обеспечивающий совершенствование традиционного подхода при создании чугунов с заданным набором физико-механических свойств. Производственные испытания программы показали, что она эффективно работает в рамках первоначально заложенных данных, в связи с чем, была внедрена в технологический процесс литейного предприятия.

4. По итогам сравнительных лабораторных испытаний на износ установлено, что износостойкость марганцовистого чугуна как в литом так и закаленном состоянии превосходила серый фосфористый чугун в среднем 2,2 ... 3 раза. По износостойкости закаленный аустенитный чугун несколько уступал литому, но при этом в 1,8 ... 2 раза меньше изнашивал сопряженный с ним стальной ролик. Данный факт является особо значимым, так как проблема повышения ресурса металлоемкого дорогостоящего ж.-д. колеса, по-прежнему, остается одной из приоритетных задач научных исследований. В связи с чем, рекомендуем проведение дополнительных стендовых и эксплуатационных испытаний закаленного марганцовистого чугуна применительно к тормозной паре колодка – железно-дорожное колесо. В паре с фрикционным материалом износ аустенитного чугуна был в 1,8 и 2,2 раза меньше, чем сталь 40X и СЧ 28-48, соответственно.

5. Установлено, что высокая износостойкость марганцовистого чугуна в литом состоянии объясняется его более совершенной структурой, состоящей из метастабильного аустенита, упрочненного мелкодисперсными карбидами, равномерно распределенными в металлической матрице. В процессе трения поверхность образцов упрочнялась от наклепа аустенита и превращения его в мартенсит деформации.

6. Получены уравнения регрессии, определяющие связь между физико-механическими параметрами марганцовистого чугуна и нагрузочно-скоростными факто-

рами (удельным давлением, скоростью скольжения). Установлены области наиболее благоприятного сочетания нагрузочных режимов эксплуатации деталей из аустенитного чугуна при сухом трении, соответствующие режимам работы тормозных шкивов ПТМ.

7. Эксплуатационные испытания качественно подтвердили результаты лабораторных исследований. При этом экономический эффект от использования марганцовистого чугуна (после литья) для тормозных шкивов ПТМ взамен стали 40Х составил 174254 руб. при условной годовой программе 1000 шкивов. Предполагаемый экономический эффект от использования марганцовистого чугуна в закаленном состоянии для тормозных колодок локомотива, взамен серого фосфористого чугуна, составил 95770 руб. на 1000 колодок.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России

1. Спири́н, Е. А. Возможность использования марганцовистого чугуна как материала для быстроизнашивающихся деталей лесных и дорожно-строительных машин [Текст] / Е. А. Спири́н, Д. А. Попов // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. Вып. 181. – 2007. – С. 111-115.

2. Станчев, Д. И. Износостойкий аустенитный марганцовистый чугун в условиях сухого трения применительно к тормозам подъёмно-транспортных и лесовозных машин [Текст] / Д. И. Станчев, Д. А. Попов, В. В. Шабанов // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. Вып. 185. – 2008. – С. 159-166.

другие публикации

3. Станчев, Д.И. Перспективы применения специального аустенитного марганцовистого чугуна для деталей фрикционных узлов лесных машин [Текст] / Д.И. Станчев, Д.А. Попов // Актуальные проблемы развития лесного комплекса : Материалы международной научно-технической конференции ВГТУ. – Вологда, 2007. – С. 109-111

4. Попов, Д. А. Анализ работы фрикционных пар трения лесовозных и подъемно-транспортных машин. Возможный путь повышения их долговечности [Текст] / Д. А. Попов // Перспективные технологии, транспортные средства и оборудование при производстве эксплуатации, сервисе и ремонте : сб. науч. тр. Вып.2 – Воронеж, 2007. – С. 41-44.

5. Станчев, Д. И. Аналитическая база данных при разработке и обосновании производства деталей машин [Текст] / Д. И. Станчев, Д. А. Попов, Е. А. Спири́н. Приоритетные направления развития науки и техники : доклады Всеросс. науч.-техн. конф. / под общ. ред. чл.-корр. Российской акад. Наук В.П. Мешалкина. – Тула : ТулГУ, 2007. – 164-166 с.

6. Станчев, Д. И. Модель оптимизации состава материала и стоимости, входящих в него компонентов [Текст] / Д. И. Станчев, Е. А. Спири́н Д. А. Попов. Приоритетные направления развития науки и техники : доклады Всеросс. науч.-техн. конф. / под общ. ред. чл.-корр. Российской акад. Наук В.П. Мешалкина. – Тула : ТулГУ, 2007. – С. 166-168.

7. Попов, Д. А. Исследование влияния термической обработки аустенитного марганцовистого чугуна на его структуру и физико-механические свойства [Текст] / Д. А. Попов, Е. А. Спири́н. Приоритетные направления развития науки и техники : доклады Всеросс. науч.-техн. конф. / под общ. ред. чл.-корр. Российской акад. Наук В.П. Мешалкина. – Тула : ТулГУ, 2007. – С. 170-171.

8. Станчев, Д. И. Методика исследования явлений в поверхностных слоях трения [Текст] / Д. И. Станчев, Д. А. Попов // Математическое моделирование, компьютерная оптимизация технологий, параметров оборудования и систем управления. Меж. Вуз. Сб. науч. тр. Вып.11 – Воронеж, 2006. – С.65-68.

9. Патент 2313609 Российская Федерация, МПК С22С 37/10. Износостойкий чугун [Текст] / Станчев Д. И., Попов Д. А. ; заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. лесотехн. акад. - № 2006125249 ; заявл. 13.07.06 ; опубл. 27.12.07, Бюл. № 36. – 4 с.

10. Патент 2337175 Российская Федерация, МПК С22С 37/10. Износостойкий чугун [Текст] / Станчев Д. И., Попов Д. А. ; заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. лесотехн. акад. - № 2007108431 ; заявл. 06.03.07 ; опубл. 27.10.08, Бюл. № 30. – 4 с.

11. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Программный комплекс для оптимизации и прогнозирования технологического процесса производства отливок из чугуна [Текст] / Д. И. Станчев, Д. А. Попов, В. В. Посметьев ; правообладатель ВГЛТА. - заявл. 2007614281; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ № 2008610110 от 9 января 2008.

12. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Программа для управления рентгеновским аппаратом ДРОН-2 в дискретном режиме при исследовании сплавов аустенитного класса [Текст] / Д. И. Станчев, Д. А. Попов, В. В. Посметьев ; правообладатель ВГЛТА. - заявл. 2007612500 ; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ № 2007613545 от 15 августа 2007.

Подписано в печать 5 .02.2009. Формат 60×84 1/16
Печатных листов 1,0. Тираж 100 экз. Заказ .

Курский государственный технический университет
Издательско-полиграфический центр
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября.