

На правах рукописи

Брюнчуков Григорий Иванович

**БАНДАЖИ ТЯГОВОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА
ПОВЫШЕННОЙ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ
СТОЙКОСТИ**

Специальность 05 16 01 – Металловедение и термическая обработка
металлов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



003059505

A handwritten signature in black ink, consisting of several stylized, overlapping loops and lines.

Москва – 2007 г

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии Всероссийский научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ФГУП ВНИИЖТ)

Научный руководитель доктор технических наук
Марков Дмитрий Петрович

Официальные оппоненты доктор технических наук, профессор
Ушаков Борис Константинович (МГВМИ);
кандидат технических наук
Борц Алексей Игоревич (ВНИИЖТ).

Ведущая организация ФГУП Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им И П Бардина

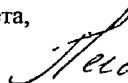
Защита диссертации состоится «30» мая 2007 г в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 218 002.02 в Федеральном государственном унитарном предприятии Всероссийский научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта по адресу 129851, г Москва, 3-я Мытищинская ул , д 10, конференц-зал

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института

Автореферат разослан «28» апреля 2007 г

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью, просим направлять в адрес диссертационного совета института

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук

 Г И Пенькова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В настоящее время бандажи локомотивов уступают по механическим свойствам (в частности, по твердости) вагонным колесам и рельсам, а также их зарубежным аналогам. Например, в международный стандарт на бандажи ISO 1005-1 еще в 1994 году была включена сталь марки C77GT с содержанием углерода 0,77-0,80 % и прочностью 1050-1200 МПа. Прочность отечественных бандажей из стали марки 2, изготавливаемых в настоящее время по ГОСТ 398-96, не превышает 1100 Мпа. Твердость серийных бандажей относительно не высока (не более 285 НВ на глубине 20мм от поверхности катания) и наблюдается большой перепад ее по сечению, что обусловлено низкой прокаливаемостью бандажной стали марки 2 и недостатками существующей технологии закалки в стопах.

Анализ повреждаемости бандажей в эксплуатации свидетельствует, что основной причиной их обточек являются повреждения гребня в форме износа, подреза и остроконечного наката. Согласно статистическим данным вследствие интенсивного износа гребня производится до 75 % всех обточек бандажей тепловозов и до 50 % – электровозов. Вторая по важности причина обточек – повреждение поверхности катания дефектами контактно-усталостного происхождения (преимущественно у бандажей электровозов). Анализ динамики общего количества обточек локомотивных бандажей на сети железных дорог свидетельствует, что сложившаяся ситуация не меняется уже в течение 10 лет.

Фактический средний срок службы электровозных и тепловозных бандажей в настоящее время составляет 470 и 410 тыс. км соответственно, что примерно в полтора раза меньше, чем установленный ресурс до среднего ремонта локомотива, при котором и должна производиться выкатка колесных пар со сменой бандажей.

Большие проблемы возникают в связи с несчастными, но очень опасными случаями разрывов локомотивных бандажей в эксплуатации в результате

образования усталостных трещин в гребне (около 80 % всех разрушений) Фактический пробег до разрушения таких бандажей, как правило, не превышает 100 тыс км, что приводит к необходимости преждевременной их замены и дополнительным финансовым затратам на локомотивное хозяйство

В связи с этим задача повышения эксплуатационной стойкости локомотивных бандажей, а в первую очередь их износостойкости и контактно-усталостной выносливости является весьма актуальной. Снижение числа разрушений бандажей вследствие возникновения трещин в гребне или полное их исключение позволит значительно повысить безопасность движения и средний срок службы бандажей

Цель работы

Целью диссертационной работы является повышение эксплуатационной стойкости локомотивных бандажей за счет увеличения прочностных характеристик стали с учетом требований надежности в эксплуатации

В настоящей работе поставлены и решены следующие задачи

- 1) Повышение износостойкости бандажей не менее чем в полтора раза,
- 2) Повышение контактно-усталостной выносливости бандажей на 25-30 %,
- 3) Доведение ресурса бандажей до 600-700 тыс км

Методики исследований

Теоретическое исследование и выбор химического состава опытных бандажных сталей марок «Б» и «П» с повышенной твердостью (320-360 НВ на глубине 20 мм от поверхности катания) проведены методом расчета углеродных эквивалентов (C_3) по критерию получения требуемого уровня прочностных свойств при закалке бандажей в стопах. Расчет проведен на основе интерполированных зависимостей прочностных свойств (σ_B , НВ) бандажной стали производства НТМК от химического (Z_Y) и углеродного (C_3) эквивалентов ее состава. Достоверность расчета химического состава опытных бандажных сталей подтверждена анализом термокинетических диаграмм распада аустенита

Экспериментальное исследование бандажей включало определение химического состава стали методом количественного спектрального анализа на приборе «Spectrolab» в соответствии с Инструкцией по методам контроля № 353 и ГОСТ 7601, измерение твердости по методу Бринелля и Виккерса (ГОСТ 9012 и ГОСТ 2999), определение механических свойств на разрывных образцах по ГОСТ 1497, определение ударной вязкости путем испытания на ударный изгиб образцов по ГОСТ 9454, металлографический анализ, сравнительные испытания на износостойкость и контактно-усталостную выносливость, определение остаточных окружных напряжений первого рода по специально разработанной методике, стендовые испытания на циклическую трещиностойкость k_{IC} методом циклического нагружения на электрогидравлическом пульсаторе с коэффициентом асимметрии 0,1 и частотой действия переменной нагрузки 5 Гц по схеме трех точечного изгиба в соответствии с методикой СТ ССФЖТ ТМ 154-2002

Полигонные испытания опытной партии локомотивных бандажей были проведены по специально разработанной методике на Экспериментальном кольце г Щербинка

Научная новизна

1 Разработана новая марка бандажной стали непрерывной разливки с повышенным содержанием углерода (0,65-0,75 %) и хрома (0,2-0,6 %), с уровнем твердости 320-360 НВ, показавшая при полигонных и эксплуатационных испытаниях повышенную износостойкость и контактно-усталостную выносливость по сравнению с серийной сталью

2 На практике показано, что бандажи из стали повышенной прокаливаемости и закаливаемости (с повышенным содержанием углерода и хрома) не более склонны к образованию термомеханических трещин, чем серийные

3 Показано, что при снижении содержания углерода до 0,40-0,50 % и повышении содержания хрома до 0,8-1,2 % в бандажах появляется игольчатая

микроструктура верхнего бейнита с низкой контактно-усталостной выносливостью и циклической вязкостью разрушения

Практическая ценность работы

- 1) Разработана нормативная документация в виде технических условий ТУ 0941-096оп-01124323-2004 «Бандажи черновые локомотивные повышенной износостойкости»,
- 2) Изготовлена опытная партия локомотивных бандажей повышенной износостойкости из высокоуглеродистой стали марки «П»

Апробация работы

Основные положения, промежуточные и итоговые результаты диссертационной работы были доложены и опубликованы в трудах шестой научно-практической конференции «Безопасность движения поездов» (г Москва, 2005 г), научной конференции молодых ученых и аспирантов по развитию железнодорожного транспорта в условиях реформирования (г Щербинка, 2006) и научной конференции ученых института по современным проблемам железнодорожного транспорта (г Щербинка, 2007)

Разделы диссертационной работы ежегодно (2004-2007 гг) обсуждались на научно-технических совещаниях комплексного отделения «Транспортное металловедение» ФГУП ВНИИЖТ

Публикации

По теме диссертации опубликовано четыре печатных работы. Оформлены технические условия ТУ 0941-096оп-01124323-2004 «Бандажи черновые локомотивные повышенной износостойкости»

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, восьми глав и общих выводов. Объем работы составляет 161 страницу текста, включая 30 таблиц, 74 рисунка и 4 приложения. Список литературных источников содержит 112 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе рассмотрены основные виды повреждений локомотивных бандажей, наблюдающиеся в эксплуатации в настоящее время, и проведен анализ результатов эксплуатационных испытаний различных марок бандажей за последние 50 лет. Кроме этого, в главе подробно исследовано влияния остаточных напряжений на повреждаемость локомотивных бандажей.

Анализ повреждаемости бандажей в эксплуатации показал, что основными причинами их обточек являются предельный износ гребня по толщине и появление выщербин контактно-усталостного характера, причем такая ситуация не меняется уже в течение 10 лет. Фактический средний срок службы электровозных и тепловозных бандажей в настоящее время примерно в полтора раза меньше, чем установленный ресурс до среднего ремонта локомотива, при котором и должна производиться выкатка колесных пар со сменой бандажей.

Поскольку основной причиной снижения срока службы локомотивных бандажей являются износные и контактно-усталостные повреждения, при разработке новых марок бандажной стали следует ориентироваться в первую очередь на повышение уровня механических свойств локомотивных бандажей, что благоприятно скажется на их служебных характеристиках.

Такие работы проводились в период с 1952 по 1960 гг. при сравнительных эксплуатационных испытаниях стандартных и опытных электровозных бандажей с содержанием углерода от 0,60 до 0,77 % и паровозных бандажей с содержанием углерода от 0,63 до 0,82 % (твердость бандажей находилась в пределах 240-285 МПа). Испытания показали, что средняя интенсивность износа практически одинакова для всех групп бандажей и составляет $0,43-0,47 \text{ мм}/10^4 \text{ км}$. В связи с этим была дана рекомендация о снижении содержания углерода в бандажной и колесной стали, поскольку на сталях с высоким содержанием углерода образование частиц «белого слоя» происходит интенсивнее, чем на малоуглеродистых сталях. Эти выводы были положены в основу нового стандарта на бандажи ГОСТ 398-57.

Наблюдение за износом гребней электровозных бандажей, выполненное в 1959-1965 гг., показало, что в условиях интенсивного гребневого износа содержание углерода в бандажной стали оказывает значительно более сильное влияние на износостойкость по сравнению с прочностью. Высокоуглеродистые бандажи марки IV по ГОСТ 398-41 оказались практически в два раза более износостойкими по сравнению с бандажами марки II по ГОСТ 398-57, имеющими такую же прочность, но меньшее содержание углерода. На основании полученных результатов было рекомендовано использовать для изготовления бандажей сталь с содержанием углерода 0,70 % и твердостью не менее 270-285 НВ.

В 1970-1980 гг. были проведены сравнительные эксплуатационные испытания опытной партии бандажей с повышенным до 0,69 % содержанием углерода и прочностью 1117-1142 МПа. Опытные бандажи эксплуатировались на тепловозах 2ТЭ10В с безгребневыми колодками на Северной и Дальневосточной железных дорогах, где высока доля выхода бандажей по контактной усталости (выщербини). За время наблюдений не было случаев браковки бандажей по усталостным и тормозным дефектам. Износостойкость опытных бандажей была на 20 % выше стандартных. По результатам проведенных испытаний в 1986 году Г. В. Лариным было рекомендовано для бандажей грузовых локомотивов всех типов, оборудованных безгребневыми тормозными колодками, использовать сталь с содержанием углерода, повышенным до 0,69 %, имеющую временное сопротивление в диапазоне 1000-1150 МПа. Однако рекомендации по внедрению сталей с повышенным содержанием углерода реализованы не были.

В 2002-2004 гг. были проведены эксплуатационные испытания опытной партии бандажей со средним содержанием углерода на верхнем пределе ГОСТ 398-96 для стали марки 2 (0,65 %). Уровень твердости опытных бандажей был на 8-16 НВ выше, чем серийных. Анализ поведения в эксплуатации и состояния опытных бандажей показал, что их средняя интенсивность износа практически та же, что и у серийных бандажей. Например, наблюдение за электровозами

ВЛ80С на Горьковской железной дороге показало, что средняя интенсивность износа высокоуглеродистых бандажей составила 0,37, серийных бандажей – 0,41 мм на 10 тыс км

В последние десятилетия технология производства бандажей была ориентирована в первую очередь на достижение наибольших показателей прочности и твердости бандажной стали за счет интенсификации процесса термического упрочнения, без изменения химического состава стали. Однако, повышение прочностных характеристик стали за счет ужесточения режимов закалки приводит к увеличению уровня остаточных напряжений в бандажах после термообработки. Высокие растягивающие остаточные напряжения (преимущественно - окружные), реализующиеся в центральной зоне сечения бандажа после интенсифицированного термического упрочнения, при наличии в этой зоне концентраторов в виде надрывов или металлургических дефектов приводили к разрушению бандажей.

Во второй главе проведен анализ влияния химического состава и структуры бандажной стали на основные характеристики эксплуатационной стойкости: износостойкость, контактно-усталостную выносливость, термическую стойкость и сопротивление хрупкому разрушению. В главе подробно рассмотрены и проанализированы исследования и разработки в области повышения эксплуатационной стойкости локомотивных бандажей таких известных ученых, как Щапов Н П, Ларин Т В, Кислик В А, Узлов А Г, Девяткин В П, Школьник Л М и Марков Д П.

Прочностные свойства и служебные характеристики бандажной стали определяются содержанием углерода, легирующих элементов и режимом термической обработки (закалка и последующий отпуск). С увеличением содержания углерода возрастают ее прочностные характеристики (твердость, предел прочности, предел текучести) и снижаются пластические (относительное удлинение, относительное сужение, ударная вязкость).

Существенным недостатком серийной бандажной стали является малая устойчивость переохлажденного аустенита и низкая прокаливаемость. Малая

прокаливаемость обуславливает и низкую закаливаемость. Чем ниже содержание углерода, тем меньше закаливаемость и, естественно, твердость.

Многочисленными исследованиями установлено, что увеличение содержания углерода и уровня твердости приводит к значительному повышению износостойкости бандажной стали. Например, износостойкость стали с содержанием углерода 0,75 % и твердостью 320 НВ в 2,5 раза выше, чем стали с содержанием углерода 0,65 % и твердостью 260 НВ.

Чем выше твердость стали, тем меньшее влияние оказывает содержание углерода на ее свойства. При твердости стали свыше 300 НВ влиянием углерода уже можно пренебречь. Тем не менее, в мировой практике сохраняется тенденция повышения содержания углерода и легирующих элементов в колесо-бандажных сталях. Это необходимо для повышения прокаливаемости стали и получения более равномерного распределения твердости по сечению бандажей.

Повысить износостойкость бандажей можно за счет применения стали с мелкозернистой пластичной структурой и высоким уровнем твердости, которая оказывает сильное влияние на износостойкость.

Многие исследователи отмечают, что повышение содержания углерода в бандажной стали приводит к незначительному повышению сопротивления контактной усталости, в то время как с увеличением твердости предел контактно-усталостной выносливости повышается многократно. При увеличении твердости с 275 до 650 НВ контактно-усталостная долговечность возрастает более чем в 6 раз.

Исследования механизма образования на бандажах повреждений термического характера, проведенные различными авторами, показывают, что повышение содержания углерода в бандажной стали снижает ее термическую стойкость и стойкость к образованию дефектов (выщербин) тормозного характера. Согласно теории Г.В. Ларина, с увеличением содержания углерода в стали снижается ее устойчивость против термического разрушения, причем,

начиная с 0,5 % углерода и выше, наблюдается более интенсивное падение термической стойкости, чем при 0,3-0,5 % углерода

Считается, что повысить термическую стойкость бандажей можно за счет снижения содержания углерода, скомпенсировав потерю прокаливаемости легированием

Циклическая трещиностойкость (вязкость разрушения) бандажной стали влияет на выносливость бандажей при циклическом нагружении и на их сопротивляемость разрушению в эксплуатации, в том числе и хрупкому. Склонность к хрупкому разрушению бандажной стали определяется прежде всего положением порога хладноломкости. Увеличение содержания углерода повышает порог хладноломкости и снижает ударную вязкость. Легирование сильными карбидообразователями, связывающими углерод, понижает порог хладноломкости.

Существенное влияние на циклическую вязкость разрушения и склонность к хрупкому разрушению оказывает чистота стали по неметаллическим включениям и содержание газов. Водород, кислород и азот снижают ударную вязкость и резко повышают порог хладноломкости.

Таким образом, бандажная сталь должна обладать рядом свойств, наиболее важные из которых – износостойкость, контактно-усталостная выносливость, обеспечиваемые в основном повышением твердости, а также термостойкость и стойкость к усталостному разрушению. Проведенный анализ показывает, что для решения поставленной задачи бандажная сталь должна иметь твердость не менее ~340 НВ.

В третьей главе рассмотрены основные этапы развития отечественного бандажного производства, проведено сравнение технических требований к бандажной стали по ГОСТ и по ISO и проанализированы особенности и недостатки современного технологического процесса производства бандажей на ОАО «НТМК».

В России локомотивные бандажи производятся и эксплуатируются уже более века, что позволило накопить большой опыт в этой области. В основу

первых технических требований к бандажной стали и последующих стандартов были положены исследования в этой области таких известных российских ученых, как Ларин Т В , Кислик В А , Узлов А Г , Девяткин В П , Школьник Л М

Анализ развития технических требований к бандажам за последние 40 лет показывает, что совершенствование бандажной стали происходило в направлении постоянного увеличения прочностных свойств в основном за счет интенсификации режимов термической обработки. Однако резервы повышения прочности и твердости бандажной стали в пределах составов, регламентируемых существующим стандартом ГОСТ 398-96, полностью себя исчерпали. Действующий стандарт на бандажи содержит две марки стали: сталь 2 и сталь 3. Сталь 3, известная как ванадиевая, сейчас не применяется. Бандажи локомотивов, изготавливаются из стали марки 2 и по своим прочностным характеристикам уступают вагонным колесам и рельсам, а также их зарубежным аналогам (табл. 1). Например, в международный стандарт на бандажи ISO 1005-1 еще в 1994 году была включена сталь марки C77GT с содержанием углерода 0,77-0,80 % и прочностью 1050-1200 МПа. Реальная прочность отечественных бандажей сейчас не превышает 1050 МПа. Твердость стандартных бандажей также не высока и не превышает 285 НВ на глубине 20 мм от поверхности катания. При этом наблюдается большой перепад твердости по сечению, что обусловлено низкой прокаливаемостью бандажной стали марки 2. Таким образом стандарт ISO ориентирован на обеспечение механических свойств и твердости бандажей за счет повышения содержания углерода в стали и более усиленного легирования, в то время как прочностные характеристики российской бандажной стали обеспечиваются в основном за счет интенсификации термического упрочнения посредством закалки.

В настоящее время единственным поставщиком локомотивных бандажей в России является ОАО «НТМК». Процесс изготовления бандажей характеризуется высококачественной технологией выплавки и разливки стали,

удовлетворяющей всем современным требованиям, и устаревшей технологией деформационной и термической обработки

Таблица 1

Химический состав и механические свойства локомотивных бандажей
в соответствии с требованиями ГОСТ 398-96 и ISO 1005-1

Марка стали	Химический состав, %				Механические свойства				
	C	Si	Mn	V	σв, МПа	δ, %	ψ, %	Твердость, НВ	КСУ, Дж/см ²
2 (по ГОСТ 398-96)	0,57- 0,65	0,22- 0,45	0,60- 0,90	<0,15	930- 1110	10	14	269	25
3 (по ГОСТ 398-96)	0,60- 0,68	0,22- 0,45	0,60- 0,90	0,06- 0,15	1000- 1270	8	12	275	20
C77GT-E (по ISO 1005-1)	0,77- 0,80	0,38- 0,40	0,86- 0,90	<0,05	1050- 1200	10	-	-	8

В мировой практике известны два основных направления совершенствования бандажных сталей – создание малоуглеродистых высоколегированных, в т.ч. бейнитных сталей и создание высокоуглеродистых нелегированных или малолегированных сталей. В работе принято решение реализовать оба эти направления.

В четвертой главе проанализировано влияние содержания углерода, легирующих элементов и примесей на структурные превращения и прокаливаемость бандажной стали производства НТМК и приведены теоретические предпосылки для выбора химического состава и режима термической обработки бандажей повышенной эксплуатационной стойкости.

Углерод и практически все легирующие элементы замедляют скорость распада аустенита в интервале перлитного превращения, т.е. повышают степень переохлаждения аустенита и прокаливаемость стали. Наиболее сильно увеличивают прокаливаемость хром, никель и марганец, поэтому они входят в состав большинства углеродистых легированных сталей. Прокаливаемость стали может быть существенно увеличена при совместном легировании

несколькими элементами Таково, например, совместное действие хрома, никеля и меди

Важным преимуществом хрома как легирующего элемента является то, что он, растворяясь в феррите, уменьшает его вязкость значительно слабее других элементов и способствует некоторому повышению порога хладноломкости стали и ее стойкости к хрупкому разрушению

При разработке новых марок бандажной стали необходимо учитывать следующие важнейшие особенности ее производства на ИТМК в процессе выплавки стали для ее раскисления применяется алюминий, выплавляемая сталь является естественно легирующей ванадием

Таким образом, выплавляемая бандажная сталь является наследственно мелкозернистой и, следовательно, очень требовательной к режимам ее термической обработки. Природный ванадий, содержащийся в бандажной стали, дает возможность существенного упрочнения металла, обусловленного двумя механизмами

- Измельчение структурных составляющих (аустенитного зерна при образовании аустенита и феррито-перлитной смеси при его распаде) вследствие того, что нерастворенные мелкодисперсные карбиды или карбонитриды ванадия играют роль центров кристаллизации, а также тормозят диффузионное продвижение границ зерен,
- Увеличение прокаливаемости и стойкости стали к отпуску в результате замедления диффузионных процессов при структурных превращениях растворенным в аустените ванадием

Однако, поскольку эти два механизма антагонистичны, трудно добиться одновременного увеличения прокаливаемости стали и высокой дисперсности ее структурных составляющих

Прокаливаемость бандажной стали – одно из важнейших свойств, определяющих срок службы бандажа. От величины прокаливаемости зависит распределение твердости и градиент изменения механических свойств по сечению бандажа. Твердость серийных бандажей не превышает 285 НВ на

глубине 20 мм от поверхности катания, а перепад твердости по сечению составляет 40-60 НВ. За время эксплуатации вследствие износа и обточек толщина черного бандажа уменьшается на 40-45 мм, т.е. до середины сечения, поэтому срок его службы во многом зависит от разницы в твердости поверхности катания и центральной части. Чем больше разница в твердости поверхности катания бандажа в начале и в конце эксплуатации, тем меньше его срок службы.

Во ВНИИЖТ и УкрЧермет была проведена работа по выявлению степени влияния на прокаливаемость бандажной стали производства ИТМК различных легирующих элементов (С, Мп, Сг, Ni и Cu) и температуры нагрева под закалку. Согласно полученным результатам, изменение содержания $[\%Cr+\%Ni+\%Cu]$ на 0,1 % приводит к изменению прокаливаемости приблизительно на 1,6 мм, при этом вклад каждого из указанных элементов в прокаливаемость приблизительно одинаков.

Степень влияния углерода на прокаливаемость несколько меньше, чем суммарного содержания хрома, никеля и меди (при изменении содержания углерода на 0,1 % прокаливаемость меняется на 1,4 мм).

Установлено, что влияние на прокаливаемость марганца в 4-5 раз меньше, чем углерода, хрома, никеля и меди. При изменении содержания марганца на 0,1 % прокаливаемость изменяется не более чем на 0,3 мм.

Поскольку ГОСТ 398-96 допускает пределы изменения содержания $[\%Cr+\%Ni+\%Cu]$ в 6 раз больше, чем пределы содержания углерода, то прокаливаемость стали практически полностью определяется суммой этих легирующих примесей. Представляется неверным, что действующий стандарт, регламентируя верхний предел содержания хрома, никеля и меди, не регламентирует нижний. Снижение содержания $[\%Cr+\%Ni+\%Cu]$ до 0,1 % приводит к уменьшению прокаливаемости бандажной стали с 0,6 % углерода практически до нуля. Это приводит к резкому падению уровня прочностных свойств бандажей до минимально допустимого.

Чтобы выявить предел возможностей стандартной бандажной стали был

проведен следующий лабораторный эксперимент. Сегмент черного бандажа в течении 1 ч нагрели в печи до 900 °С и закалили погружением в бак с водой комнатной температуры. Охлаждение сегмента было всесторонним, т.е. более интенсивным, чем закалка бандажей в стопах на комбинате. На рис. 1 представлена диаграмма кинетики охлаждения бандажа, полученная с помощью термопары, помещенной на глубину 20 мм от поверхности. По диаграмме установлено, что на контрольной глубине скорость охлаждения бандажа в интервале 600-500 °С ($\omega_{6/s}$) невысока и составляет 5,2 °С/с.

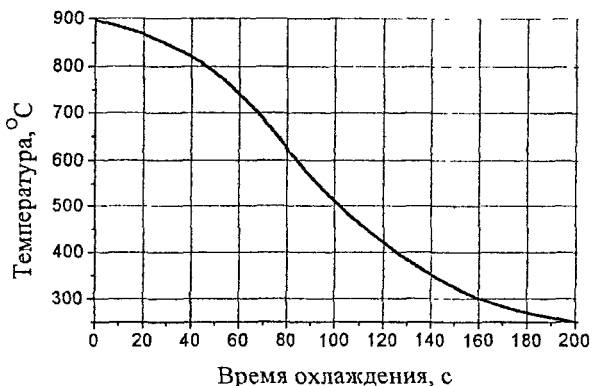


Рис. 1 Кинетика охлаждения сегмента бандажа при закалке в воду

Распределение твердости по сечению закаленного бандажа представлено на рис. 2. Даже при интенсивном 4-х стороннем охлаждении толщина закаленного слоя бандажа, в котором имеет место мартенситное превращение, не превышает 5-7 мм.

Согласно результатам эксперимента, получить в бандаже на глубине 20 мм от поверхности твердость свыше 300-310 HV₃₀ (310 HB) на стандартной стали не возможно. Поэтому, для того чтобы добиться повышения твердости по всему сечению бандажа необходимо использовать легированные стали с повышенной прокаливаемостью.

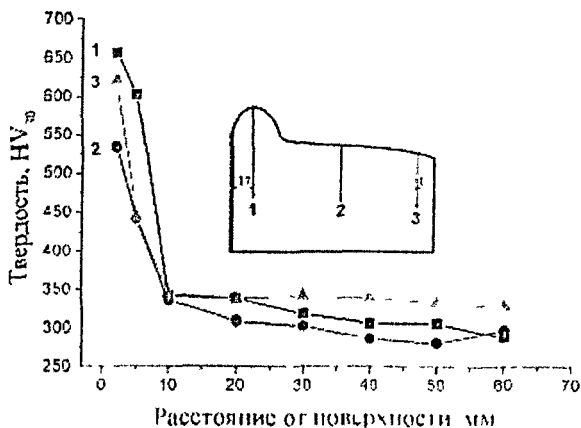


Рис 2 Распределение твердости по сечению бандажа, закаленного в воду с 900 °С при 4-х стороннего охлаждения (без отпуска)

В пятой главе проведен расчет химического состава бандажных сталей повышенной твердости и выбор режима их термической обработки

На основе теоретических предпосылок разработаны две новые марки легированной хромом бандажной стали с повышенной твердостью (320-360 НВ на глубине 20 мм от поверхности катания)

- 1) Марка «П» - с повышенным содержанием углерода,
- 2) Марка «Б» - с пониженным содержанием углерода

Сталь марки «П» содержит 0,65-0,75 % углерода, сталь марки «Б» - 0,4-0,5 % углерода. Кроме повышения прочности и износостойкости, сталь «Б» должна обеспечить высокое сопротивление бандажей возникновению термических трещин.

Ввиду повышения вероятности возникновения термических трещин на гребне бандажей из стали марки «П», предполагается их использование в паре с тормозными колодками с глубоким захватом или с безгребневыми колодками.

В качестве основного легирующего элемента в опытных сталях выбран хром, поскольку он позволяет максимально эффективно воздействовать на прокаливаемость стали. С целью дополнительного повышения прокаливаемости дана рекомендация снизить содержание ванадия в опытных

сталих до минимально возможного и установлено верхнее ограничение содержания ванадия 0,02 % для стали марки «Б» и 0,05 % для стали марки «П» Содержание остальных легирующих элементов в опытных сталях – аналогично ГОСТ 398-96

Расчет требуемого содержания хрома в опытных сталях был проведен с использованием зависимостей прочностных свойств стали от химического (Z_y) и углеродного (C_s) эквивалентов ее состава Критерием для расчета необходимого количества добавки хрома в каждую из опытных сталей являлось условие получения уровня твердости бандажей в пределах 320-360 НВ на глубине 20 мм При этом учитывалось, что при минимально допустимом содержании всех легирующих элементов в стали уровень твердости должен быть не ниже 320 НВ, а при максимально допустимом – не выше 360 НВ

На рис 3 представлена интерполированная зависимость предела прочности бандажной стали производства НТМК от химического эквивалента при скорости охлаждения $\omega_{6/3}$ в интервале 5,0-5,5 C°/с (закалка в бандажей в стопах) Из диаграммы на рис 3 следует, что требуемый уровень твердости стали 320-360 НВ (прочность 1050-1270 МПа) может быть достигнут при химическом эквиваленте $Z_y=1,224 \quad 1,265$

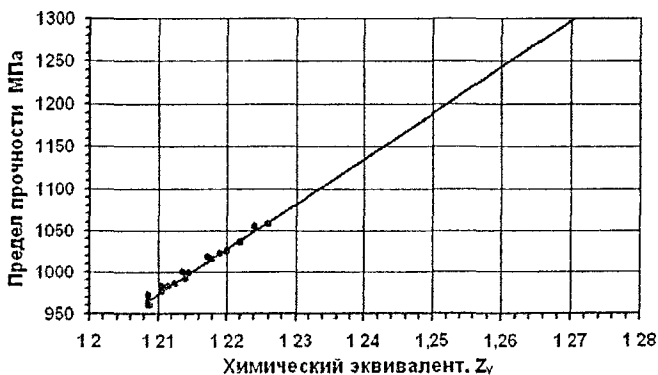


Рис 3 Зависимость предела прочности бандажной стали производства НТМК от химического эквивалента ее состава Z_y ($\omega_{6/3}=5,0-5,5$ C°/с)

Диаграмма на рис 4 показывает взаимосвязь химического и углеродного эквивалентов бандажной стали при различных значениях структурного параметра γ , который характеризует изменение количества и свойств перлита в углеродистых сталях в зависимости от содержания углерода и кремния. Структурный параметр γ может быть рассчитан по следующей формуле

$$\gamma = 4,6 \times [\%C] + 2 \times [\%Si] \quad (1)$$

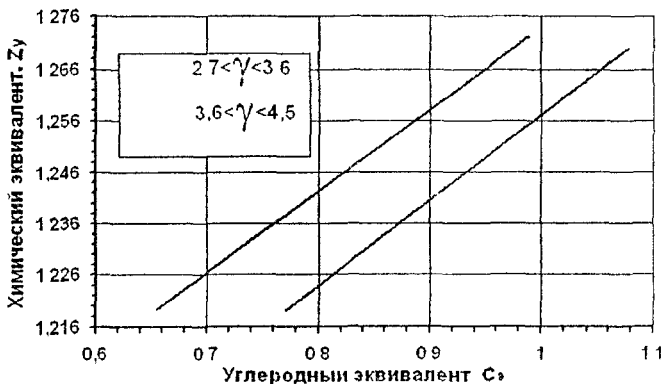


Рис 4 Соотношение химического и углеродного эквивалентов бандажной стали производства НТМК в зависимости от структурного параметра γ

Расчетные значения γ при средне допустимом содержании углерода и кремния составляют 3,37 для стали марки «Б» и 3,9 для стали марки «П»

Согласно диаграмме на рис 4, химическому эквиваленту $Z_\gamma = 1,224 - 1,265$ для стали марки «Б» соответствует углеродный эквивалент $C_\gamma = 0,69 - 0,94$, а для стали марки «П» - углеродный эквивалент $C_\gamma = 0,80 - 1,05$

Углеродный эквивалент химического состава стали можно приближенно рассчитать по следующей формуле

$$C_\gamma = [C] + [Mn]/6 + [Si]/24 + [Ni]/10 + [Cr]/5 + [Mo]/4 + [Cu]/15 + [V]/14 + 5 \times [B], \quad (2)$$

где символы химических элементов обозначают их содержание в стали, %

Расчет по формуле (2) показал, что требуемые значения углеродного эквивалента могут быть обеспечены для стали марки «Б» добавкой 0,78 1,24 % хрома, а для стали марки «П» – добавкой 0,17 0,61 % хрома

Достоверность расчета химического состава опытных бандажных сталей была подтверждена анализом термокинетических диаграмм распада аустенита. По прокаливаемости опытные стали существенно превосходят стандартную (области перлитного и бейнитного превращений аустенита у них смещены в сторону меньших скоростей охлаждения). При одной и той же скорости охлаждения, соответствующей закалке бандажа в стопе по стандартному режиму, структура стандартной бандажной стали будет состоять из 85 % перлита и 15 % структурно свободного феррита (твердость около 275 НВ), а структура опытных сталей будет состоять из 100 % сорбита (твердость 327-345 НВ).

На основе полученных в результате расчета данных были разработаны технические условия ТУ 0941-096оп-01124323-2004 «Бандажи черновые локомотивные повышенной износостойкости Опытная партия». Химический состав и механические свойства опытных сталей по указанным ТУ приведены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Марка стали условная	Массовая доля элементов, %						
	C	Si	Mn	V не более	P не более	S не более	Cr
Б	0,40-0,50	0,45-0,85	0,60-0,90	0,02	0,030	0,020	0,8-1,2
П	0,65-0,75	0,22-0,45	0,60-0,90	0,05	0,030	0,020	0,2-0,6

Таблица 3

Временное сопротивление разрыву, Н/мм ²	Относительное удлинение, %, не менее	Относительное сужение, %, не менее	Твердость на глубине 20 мм, НВ, не менее	Ударная вязкость КСU, Дж/см ² не менее
1050-1270	9	12	320	25
Примечание: твердость на гребне – норма факультативная				

В соответствии с ТУ 0941-096оп-01124323-2004 на ОАО «НТМК» было изготовлено две плавки опытной бандажной стали марок «Б» и «П». Индивидуальные режимы термической обработки для каждой марки опытной стали предварительно подбирались на лабораторных образцах и окончательно были отработаны в заводских условиях НТМК (нагрев и закалка бандажей в стопах, отпуск и последующее охлаждение в термосах).

Из опытных плавок стали марок «Б» и «П» было прокатано по десять бандажей типоразмера 890x143x83 мм (тепловозные). Для каждой марки опытной стали было опробовано несколько различных режимов термической обработки (при каждом из режимов обрабатывалось один-два бандажа).

Оптимальные режимы термической обработки опытных бандажей, обеспечивающие требуемый уровень прочностных свойств при сохранении запаса пластичности и ударной вязкости, приведены в табл. 4.

Таблица 4

Марка стали	Температура закалки, °С	Длительность охлаждения в воде, с	Температура отпуска, °С	Длительность отпуска, ч
«Б»	900±10	250	500±10	2
«П»	850±10	230	500±10	2

Опытные бандажи № 4 из стали марки «Б» и № 7 из стали марки «П», прошедшие термическую обработку по указанным режимам, были направлены во ВНИИЖТ для проведения комплексного лабораторного исследования и стендовых испытаний.

В шестой главе изложены методики проведения исследований и испытаний локомотивных бандажей в лабораторных условиях и в эксплуатации.

Лабораторные исследования и стендовые испытания локомотивных бандажей проводились на базе комплексного отделения «Транспортное металловедение» Всероссийского НИИ железнодорожного транспорта.

На заключительном этапе работы были проведены полигонные испытания опытной партии локомотивных бандажей на Экспериментальном кольце

В седьмой главе приведены результаты лабораторных исследований и полигонных испытаний опытных локомотивных бандажей повышенной эксплуатационной стойкости

По химическому составу и механическим свойствам опытные бандажи полностью соответствуют ТУ 0941-096оп-01124323-2004 Дефектов макроструктуры металлургического происхождения в опытных бандажах не обнаружено Загрязненность металла бандажей неметаллическими включениями соответствует требованиям технических условий

Микроструктура опытных бандажей изучалась на поперечных микрошлифах, вырезанных с различной глубины от поверхности катания, при увеличении $\times 100$ и $\times 500$ Проведенный анализ показал, что микроструктура опытного бандажа № 4 (сталь «Б») на глубине до 15 мм – крупноигльчатый верхний бейнит, на глубине 15-40 мм – сорбитообразный и мелкопластинчатый перлит высокой степени дисперсности с включениями феррита в виде разорванной сетки

Микроструктура опытного бандажа № 7 (сталь «Г») на глубине до 10 мм - мелкодисперсный перлит с включениями специальных карбидов В основном рабочем слое этого бандажа (10-40 мм от поверхности катания) микроструктура представляет собой сорбитообразный и мелкопластинчатый перлит высокой степени дисперсности, специальные карбиды и небольшое количество избыточного феррита в виде отдельных включений Количество сорбитообразного перлита в структуре снижается по мере удаления от поверхности катания

Микроструктуры опытных бандажей имеют более высокую степень дисперсности по сравнению с феррито-перлитной микроструктурой стандартных бандажей из стали марки 2 и содержат меньшее количество избыточного феррита

Испытания на износ показали, что опытная сталь марки «П» значительно превосходит стандартную бандажную сталь по износостойкости (выше на 60 %) и средней скорости изнашивания как на начальном этапе, так и в период установившегося износа, не вызывая при этом повышенного износа контррела. Преимущество стали марки «Б» по износостойкости не столь значительно, однако при ее испытании наблюдалось существенное снижение износа рельсового контрролика. Результаты количественной сравнительной оценки износостойкости бандажных сталей и величины износа соответствующих рельсовых контрроликов представлены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты сравнительных испытаний бандажных сталей

Показатель	Сталь марки «2»	Сталь марки «Б»		Сталь марки «П»	
		абс	отн. %	абс	отн. %
износостойкость бандажного ролика, мм ¹	10,72	11,43	+6,6	17,10	+59,5
средняя скорость изнашивания бандажного ролика на начальном этапе испытания, (мм/об)×10 ³	93,30	87,50	-6,2	58,50	-37,3
средняя скорость изнашивания бандажного ролика в режиме установившегося износа, (мм/об)×10 ³	9,10	5,40	-40,7	6,50	-28,6
максимальный износ бандажного ролика, мм	17,10	13,3	-22,2	11,00	-35,7
максимальный износ рельсового контрролика, мм	0,53	0,20	-62,3	0,51	-3,8
предел контактно-усталостной выносливости, об×10 ⁵	2,06	1,61	-21,9	2,57	+24,8
циклическая вязкость разрушения (трещиностойкость) K _{IC} , МПа×м ^{1/2}	92	69	-25	84	-8,7

Результаты определения предела контактно-усталостной выносливости бандажных сталей представлены в табл. 5. Как показало испытание, предел контактно-усталостной выносливости опытной стали марки «П» на 25 % выше, чем серийной бандажной стали. Контактно-усталостная выносливость опытной стали марки «Б» оказалась ниже, чем серийной стали.

Значительное повышение износостойкости и контактно-усталостной выносливости бандажей из стали марки «П» объясняется наличием в их

микроструктуре сорбитообразного перлита и множественных включений специальных карбидов. Снижение контактно-усталостной выносливости стали марки «Б» вызвано негативным влиянием ее крупноигльчатой микроструктуры.

Результаты стендовых испытаний на циклическую вязкость разрушения приведены в табл. 5. Критерием положительного результата испытаний являлась величина циклической вязкости разрушения не менее требуемой нормами безопасности на железнодорожном транспорте ($60 \text{ МПа} \times \text{м}^{1/2}$). Все испытанные бандажи соответствуют нормам безопасности по циклической вязкости разрушения, однако для опытной стали марки «Б» значение этого параметра находится вблизи нижней допустимой границы, то есть бандаж из этой стали как конструкция практически не имеет запаса по трещиностойкости.

На основании результатов комплексного лабораторного исследования принято решение изготовить опытную партию локомотивных бандажей из стали марки «П» с повышенным содержанием углерода и провести полигонные испытания на Экспериментальном кольце. Результаты лабораторного исследования стали марки «Б» являются неудовлетворительными.

Анализ остаточных окружных напряжений в стандартных и опытных локомотивных бандажах показал, что у всех исследованных бандажей отсутствует опасная концентрация высоких растягивающих напряжений в узкой центральной зоне сечения. Уровень растягивающих напряжений в центре сечения бандажей повышенной твердости выше, чем у стандартных, однако полученные значения не вызывают опасений. Установлено, что при закалке бандажей в стопах повышение их прочностных свойств за счет применения легированной стали с повышенным содержанием углерода приводит к повышению уровня сжимающих напряжений в поверхностном слое и не сопровождается появлением растягивающих напряжений критического уровня.

Сравнительным испытаниям на Экспериментальном кольце подвергались опытные и серийные электровозные бандажи типоразмера $1060 \times 143 \times 98 \text{ мм}$.

Опытные бандажи марки «П» с содержанием углерода 0,73 % были изготовлены на НТМК в соответствии с ТУ 0941-096оп-01124323-2004

Колесные пары с опытными бандажами марки «П» были подкачены под первую секцию электровоза ВЛ80С № 417 (колесные пары 1-4) Вторая секция (колесные пары 5-8) была оснащена стандартными бандажами марки «2» Все бандажи новые с гребнем толщиной 33 мм

С целью сравнения стойкости опытных и серийных бандажей к образованию термических трещин на гребне, одна тележка каждой секции локомотива была оборудована стандартными гребневыми колодками, а другая тележка - колодками с глубоким зацепом под гребень

Полигонные испытания проводились с экспериментальным подвижным составом, скорость движения локомотива – до 70 км/ч Испытания были разбиты на два этапа Первые 7758 км локомотив двигался вперед второй секцией Затем электровоз был развернут и двигался вперед первой секцией Суммарный пробег локомотива за время испытаний составил 15174 км

Испытания бандажей проходили в жестких условиях без смазки Во второй путь кольца были уложены рельсы с разным сроком службы, имеющие различные дефекты на рабочей поверхности

После пробега 600 км на поверхностях катания левых бандажей 5-ой и 8-ой колесных пар (стандартные), катящихся по внутреннему рельсу, были обнаружены выщербины контактной усталости глубиной 0,5-1,0 мм, располагающиеся по всей окружности катания Поскольку испытания проводились без смазки в сухую погоду, выщербины далее не развивались и постепенно закатывались На поверхностях катания бандажей марки «П» за все время испытаний выщербины не появлялись

Прокат всех бандажей был незначительным (до 0,2 мм)

Во время испытания проводилось многократное торможение локомотива (40-60 торможений на каждые 700 км пробега), происходил интенсивный износ тормозных колодок по толщине, и гребни всех бандажей входили в контакт с зацепом тормозных колодок обоих типов Тем не менее, термические трещины

на гребнях как опытных, так и серийных бандажей обнаружены не были. Взаимодействие гребней бандажей с тормозной колодкой с глубоким захватом происходило по причине плохого состояния тормозной системы конкретного электровоза.

График изменения толщины гребней направляющих колес в зависимости от пробега локомотива представлен на рис. 5

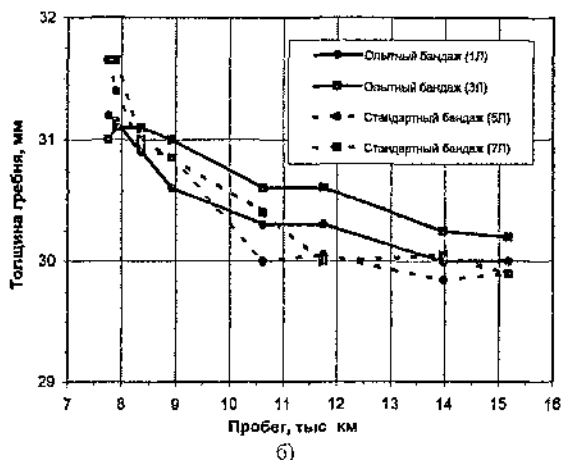
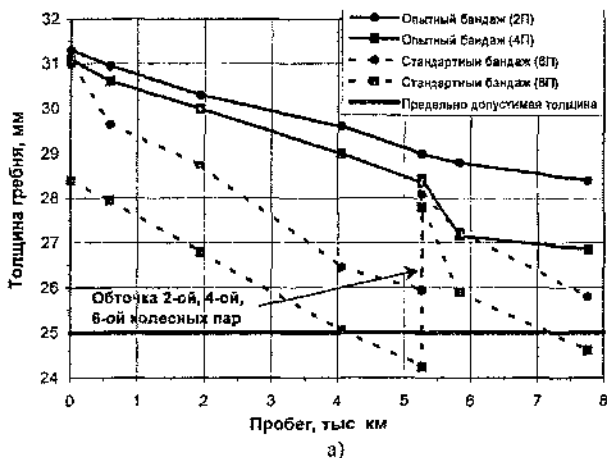


Рис. 8 Зависимость толщины гребней бандажей от пробега а) до разворота локомотива (правые направляющие колеса тележек), б) после разворота локомотива (левые направляющие колеса тележек)

Средняя интенсивность изнашивания гребней стандартных бандажей, без учета потерь металла при обточках, составила $1,6 \text{ мм}/10^4 \text{ км}$, опытных бандажей – $0,8 \text{ мм}/10^4 \text{ км}$

При проведении испытаний опытных бандажей повышенный боковой износ головки рельсов отсутствовал (замеры ширины головки проводились в прямых и кривых участках пути, на наружном и внутреннем рельсе) Согласно результатам замеров наружного рельса в кривых участках пути, который в эксплуатации наиболее подвержен боковому износу, наблюдалось утолщение его головки, что объясняется преобладанием процесса пластической деформации и расплющивания над процессом бокового износа

За время испытания все колесные пары со стандартными бандажами прошли обточку по причине интенсивного износа гребней, причем две из них обтачивались дважды В результате обточек толщина стандартных бандажей уменьшилась на 20-25 мм С опытными бандажами обтачивалась только одна колесная пара, причем только потому, что к моменту обточки стандартных бандажей параметр крутизны гребня на ней достиг предельного значения Толщина бандажей при этом изменилась на 5 мм

По результатам сравнительных полигонных испытаний опытные бандажи повышенной твердости из стали марки «П» показали высокие эксплуатационные свойства средняя интенсивность изнашивания гребней в 2 раза ниже, чем у серийных бандажей, прокат практически отсутствует На серийных бандажах обнаружены выщербины контактной усталости в начальной стадии развития, в то время как на опытных бандажах они отсутствовали

Решением межведомственной комиссии результаты полигонных испытаний опытных бандажей марки «П» признаны положительными и рекомендовано проведение эксплуатационных испытаний указанных бандажей

В восьмой главе проведен расчет экономического эффекта внедрения локомотивных бандажей повышенной твердости

Выводы по работе

- 1 Анализ накопленного опыта и проведенные эксперименты показали, что для увеличения износостойкости бандажей не менее чем в полтора раза и контактно-усталостной выносливости на 25-30 % необходимо повысить их твердость до 320-360 НВ
- 2 Показано, что можно добиться повышения прочностных свойств и прокаливаемости бандажной стали без существенного снижения пластических свойств за счет оптимизации ее химического состава путем варьирования содержания углерода, хрома и ванадия
- 3 Разработаны технические условия ТУ 0941-096оп-01124323-2004 на новые бандажные стали, существенно превосходящие по комплексу механических свойств стандартную сталь марки «2» 1) сталь марки «Б» с 0,4-0,5 % углерода и 0,2-0,6 % хрома, 2) сталь марки «П» с 0,65-0,75 % углерода и 0,8-1,2 % хрома
- 4 Лабораторные исследования показали, что сталь марки «П» превосходит серийную сталь по основным характеристикам эксплуатационной стойкости (износостойкость и предел контактно-усталостной выносливости выше на 60 % и 25 % соответственно) и имеет необходимый запас вязкости разрушения Результаты лабораторного исследования стали марки «Б» являются неудовлетворительными
- 5 Полигонные испытания показали, что опытные бандажи повышенной твердости из стали марки «П» обладают высокими эксплуатационными свойствами средняя интенсивность изнашивания гребней в 2 раза ниже, чем у серийных бандажей, проката практически нет На серийных бандажах обнаружены выщербины контактной усталости, в то время как на опытных бандажах они отсутствовали
- 7 Исследование окружных остаточных напряжений в бандажах показало, что применение легированной стали с повышенными прочностными свойствами позволяет увеличить уровень сжимающих напряжений в

поверхностном слое бандажа, не приводя в то же время к достижению критического уровня растягивающих напряжений в центре сечения

- 8 Общий экономический эффект от внедрения локомотивных бандажей повышенной эксплуатационной стойкости из стали марки «П» с учетом эксплуатационных расходов составит 326,3 млн руб /год

Основные положения и результаты диссертации изложены в следующих работах:

- 1 Брюнчуков Г И Методы повышения эксплуатационной стойкости бандажей локомотивных колес // Сб науч тр Развитие железнодорожного транспорта в условиях реформирования М Интекст, 2006 С 214-220
- 2 Брюнчуков Г И Результаты полигонных испытаний локомотивных бандажей повышенной твердости // Вестник ВНИИЖТ 2007 № 2 С 23-26
- 3 Исследование опытных локомотивных бандажей повышенной твердости / А В Кушнарев, Г И Брюнчуков, Д П Марков, А В Сухов // Вестник ВНИИЖТ 2007 № 2 С 43-47
- 4 Брюнчуков Г И, Марков Д П Экспериментальная оценка распределения остаточных напряжений в локомотивных бандажах // Сб науч тр Вопросы развития железнодорожного транспорта в условиях рыночной экономики М Интекст, 2007 С 180-188

Подписано к печати 28 04 2007 г
Формат бумаги 60х90 1/16 Объем 1,9 п л
Заказ 73 Тираж 100 экз
Типография ВНИИЖТ, 3-я Мытищинская ул, д 10