

На правах рукописи

Измюкский Владимир Аврамович

**РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ НОВЫХ РЕЖИМОВ  
ТЕРМИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ  
ПОСЛЕ ПЕЧНОГО НАГРЕВА**

Специальность 05.16.01 - "Металловедение и термическая  
обработка металлов"

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

диссертации на соискание ученой  
степени кандидата технических наук

Днепропетровск  
1994 г.

АН Украины  
им. В. Стефанюка

АВ 29.750

Диссертация выполнена на Днепровском металлургическом комбинате им. Ф. Э. Дзержинского

**НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ**

Доктор технических наук, профессор **Е. А. Шур**

**ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОПОНЕНТЫ**

Доктор технических наук, профессор **И. Г. Узлов**

Кандидат технических наук **Н. Н. Разинькова**

**ВЕДУЩЕЕ ПРЕДПРИЯТИЕ** - Мариупольский металлургический комбинат "Азовсталь"

Защита диссертации состоится "26" мая 1994 г.  
в 14 часов на заседании Специализированного совета (шифр К.141.02.01)  
в Институте черной металлургии по адресу: 320050, г. Днепропетровск,  
пл. Стародубова, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института.

Автореферат разослан

ЛНБ України ім. В. Стефаника



00801717 (0)

Ученый секретарь  
Специализированного совета,  
кандидат технических наук

**Г. В. Левченко**

В-29.758

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** К числу важнейших проблем железнодорожного транспорта, решение которых необходимо для обеспечения безопасности движения поездов, относится повышение эксплуатационной стойкости и надежности рельсов, как основного элемента верхнего строения пути.

Рост грузонапряженности, осевых нагрузок и скорости движения на железнодорожном транспорте привел к ужесточению условий эксплуатации рельсов и увеличению их износа и выходу из строя. Это обуславливает повышение требований к качеству железнодорожных рельсов и повышение эксплуатационной стойкости и надежности их за счет увеличения контактно-усталостной прочности, износостойкости, сопротивления хрупкому разрушению, живучести и др.

Опыт эксплуатации термоупрочненных рельсов производства Днепропетровского меткомбината показал, что их стойкость в пути на 20...25% ниже стойкости рельсов, подвергнутых объемной закалке в масле, и они не в полной мере удовлетворяют требованиям, которые предъявляют современные условия их эксплуатации. Для решения этой задачи на комбинате были проведены исследования, направленные на повышение качества и конструкционной прочности термоупрочненных рельсов, в частности, повышения однородности микроструктуры по сечению упрочненного слоя металла головки рельса и снижения уровня растягивающих остаточных напряжений по сечению профиля рельса, как факторов повышения конструкционной прочности и эксплуатационной стойкости рельсов в пути, а также на увеличение производительности рельсозакалочного оборудования.

Работы по теме диссертации выполнены в промышленных условиях Днепропетровского меткомбината им. Ф.Э. Дзержинского (г. Днепропетровск) а также в лабораторных условиях Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (г. Москва), Украинского научно-исследовательского института металлов (г. Харьков) и в лабораторных условиях меткомбината.

**Цель и задачи исследования.** Цель работы заключается в разработке новых режимов термического упрочнения железнодорожных рельсов применительно к действующему оборудованию Днепропетровского металлургического комбината им. Ф.Э. Дзержинского, обеспечивающих повышение качества термоупрочненных рельсов и их конструкционную прочность с одновремен-

ным увеличением производительности установки для термической обработки рельсов. Для этого необходимо решить следующие задачи:

- исследовать непосредственно в рельсозакалочном агрегате температурно-временные параметры термической обработки;
- исследовать структурные превращения в головке рельса при термическом упрочнении водой ее поверхности после печного нагрева;
- разработать режимы охлаждения водой поверхности катания головки рельсов, обеспечивающие оптимальное распределение микроструктуры и твердости по сечению термоупрочненного слоя металла;
- разработать технологические параметры охлаждения подошвы рельсов одновременно с термическим упрочнением водой их головки после печного нагрева, приводящего к снижению уровня остаточных напряжений по сечению профиля рельсов и повышению производительности оборудования участка термической обработки рельсов;
- разработать и опробовать технические решения по изменению конструкции охлаждающих устройств как для охлаждения поверхности головки, так и охлаждения поверхности подошвы рельса.

*Научная новизна работы.* Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработан и предложен на уровне изобретения механизм управления напряженным состоянием в рельсах при термическом упрочнении поверхности их головки путем одновременного ускоренного охлаждения нижней поверхности подошвы, обеспечивающий не только снижение уровня растягивающих остаточных напряжений по сечению головки рельсов, но и позволяющий формировать в головке сжимающие остаточные напряжения, благоприятно влияющие на повышение конструкционной прочности рельсов и их эксплуатационную стойкость в пути;
- предложен способ воздействия на кинетику превращений при термическом упрочнении железнодорожных рельсов Р50, основанный на изменении в широких пределах условий охлаждения поверхности головки и обеспечивающий получение однородной микроструктуры по глубине упрочненного слоя металла на расстоянии до 15 мм от поверхности;
- разработаны на уровне изобретения параметры дифференцированного по ширине подошвы охлаждения ее нижней поверхности, которые при соотношении интенсивностей охлаждения подошвы и головки, равном 0,7...0,8, и продолжительности охлаждения подошвы 30...20 секунд

обеспечивают прямолинейность выхода рельсов из закалочного агрегата.

*Практическая ценность работы.* Разработаны и оптимизированы параметры термической обработки рельсов, позволившие повысить производительность оборудования участка термической обработки рельсов с 19,3 до 22,2 т/час за счет сокращения продолжительности изгиба рельсов в гибочной машине.

Разработаны и внедрены в производство новые технические условия ТУ 14-2-674 "Рельсы железнодорожные широкой колеи типа Р50 из кислородно-конвертерной стали с закалкой поверхности катания головки по всей длине", предусматривающие охлаждение поверхности подошвы водой одновременно с термической обработкой поверхности катания головки рельсов. В соответствии с требованиями данных технических условий потребителям отгружено более 300 тыс. тонн термоупрочненных рельсов.

Внедрен в производство технологический процесс термического упрочнения водой поверхности катания головки рельсов после объемного печного нагрева с одновременным охлаждением поверхности подошвы по авторским свидетельствам N 1239170 и N 1399360, обеспечивающий благоприятное распределение уровня остаточных напряжений по элементам профиля рельса и однородность микроструктуры по сечению упрочненного слоя металла головки.

*Апробация работы.* Результаты работы доложены на двух научно-технических конференциях: Всесоюзном семинаре "Современное оборудование и технология термической и химико-термической обработки металлических материалов" - Москва (1989 г.), научном семинаре отделения металлов ВНИИЖТ - Москва (1992 г.).

Отдельные результаты диссертации приведены в заключительных отчетах научно-исследовательских работ. Темы: "Совершенствование режимов закалки рельсов с целью повышения пропускной способности участка ТОР", 1989 г.; "Совершенствование технологии закалки рельсов с принудительным подстуживанием подошвы", 1990 г.; "Совершенствование технологии термоупрочнения рельсов с целью повышения их качества", 1991 г.

*Публикации.* Основное содержание результатов исследований по теме диссертации опубликовано в 4 работах.

**Объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения и трех приложений. Работа изложена на 165 страницах машинописного текста и содержит 40 рисунков и 41 таблицу.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование выбора темы и сформулирована цель работы, ее научная новизна и практическая значимость.

### 1. Пути повышения конструкционной прочности железнодорожных рельсов

Рассмотрены современные условия работы рельсов в пути, основные пути повышения их конструкционной прочности и эксплуатационной стойкости. Из анализа литературных источников следует, что на повышение конструкционной прочности и эксплуатационной стойкости рельсов существенно влияет повышение их металлургического качества, физико-механических свойств и микроструктуры металла, а также уровень и знак остаточных напряжений. Существенное повышение физико-механических свойств металла рельсов за счет изменения его микроструктуры достигается путем термической обработки.

Дан анализ существующих способов термического упрочнения рельсов: объемной закалки в масле, термического упрочнения поверхности катания головки, как с нагрева ТВЧ, так и после печного нагрева, упрочнения рельсов с использованием тепла прокатного нагрева. Приведены преимущества и недостатки этих способов термического упрочнения рельсов, особенности формирования микроструктуры по их сечению и прочностных свойств, уровня остаточных напряжений и геометрических параметров рельсов после термического упрочнения.

Приведены методы оценки конструктивной прочности и остаточных напряжений в термоупрочненных рельсах.

На основании изученных материалов показано, что для увеличения конструкционной прочности и эксплуатационной стойкости поверхностно-упрочненных водой рельсов после печного нагрева (применительно к действующему оборудованию Днепровского металлургического комбината им. Ф. Э. Дзержинского) необходимо повысить однородность микроструктуры по сечению упрочненного слоя металла головки и снизить уровень растя-

гивающих остаточных напряжений по элементам профиля рельса. Для решения данных задач, а также с целью повышения производительности термического оборудования, необходимо совершенствовать режимы охлаждения поверхности катания головки и исследовать влияние охлаждения поверхности подошвы на уровень остаточных напряжений и конструкционную прочность рельса в целом.

## 2. Материал и методика исследований

Исследование предложенных режимов термического упрочнения производили в производственных условиях на сборных партиях рельсов Р50 из конвертерной стали К74 и К74Ц. В них входили рельсы с содержанием углерода на верхнем, нижнем и среднем пределах требований ГОСТ 24182. Для сравнения свойств термическое упрочнение рельсов также производили и по существующим режимам. При получении положительных результатов исследования проводили на рельсах отдельных плавок.

Прочностные характеристики исследуемых рельсов при испытании на растяжение и ударную вязкость определяли на продольных и поперечных образцах, вырезанных из упрочненных слоев металла головки и подошвы профиля рельса. Испытания на растяжения производили в соответствии с требованиями ГОСТ 1497, а испытания на ударный изгиб - ГОСТ 9454.

Твердость на поверхности катания головки рельсов и по поперечному сечению элементов профиля рельса определяли по Бринеллю в соответствии с требованиями ГОСТ 9012 на приборе ТШ-2М. Распределение твердости по сечению термоупрочненного слоя металла головки и подошвы определяли по Роквеллу в соответствии с требованиями ГОСТ 9013 путем вдавливания алмазного конуса на приборе ТК-2М.

Исследование микроструктуры осуществляли при помощи металлографического микроскопа "НЕОФОТ-21", оптическая система которого позволяет просматривать шлифы при увеличении от 100 до 2000 и фотографировать при увеличениях от 100 до 1200, а также просвечивающего электронного микроскопа ЭМВ-100ЕР с максимальным увеличением до 250 000 раз при использовании реплик, снятых с поверхности протравленного шлифа. Травление подготовленных микрошлифов осуществляли 4% спиртовым раствором азотной кислоты. Реплики получали путем прямого напыления углерода на поверхность шлифа.

Исследование кинетики распада аустенита конвертерной рельсовой

стали К74Ц производили на дифференциальном dilatометре УкрНИИМета на образцах от двух плавок с содержанием углерода на верхнем и нижнем пределах ГОСТ 24182 при непрерывном охлаждении в диапазоне скоростей, обеспечивающих получение микроструктур от перлита до бейнита.

Экспериментальное изучение температурно-временных характеристик по сечению головки рельса при ее термическом упрочнении производили непосредственно в закалочном агрегате путем зачеканки хромель-алюмелевых термопар в отверстия диаметром 3 мм, высверленные в головке таким образом, чтобы рабочие спаи термопар находились по оси симметрии профиля рельса на расстоянии 1,0...1,5, 5, 10 и 20 мм от поверхности катания. Характер изменения температуры в данных точках во времени фиксировали при помощи многоканальных регистрирующих приборов типа А682-003 с основной погрешностью 0,05%.

Исследование остаточных напряжений в термоупрочненных рельсах в состоянии поставки (после термической обработки и холодной правки в роликоправильной машине и штамповальных прессах) проводили путем стандартной оценки уровня остаточных напряжений в технологической пробе по величине расхождения продольной прорези по шейке длиной 400 мм, методом вырезки поперечного темплета длиной 30...40 мм и методом разрезания пробных отрезков рельсов по всему сечению на продольные бруски, обладающих достаточной точностью и простотой расчетов и измерений деформаций.

Измерение деформаций на поверхности темплета после его вырезки осуществляли при помощи проволочных тензодатчиков сопротивления с базой 25 мм и номинальным сопротивлением 400 ом. В качестве измерительного прибора использовали цифровой омметр модели Ц-34 с диапазоном измеряемых сопротивлений постоянному току от 0,001 Ом до 1000 МОм и основной погрешностью измерения не более 0,065% при измерении электрического сопротивления в пределах от 100 до 1000 Ом.

Сопротивление усталостному разрушению оценивали по уровню долговечности (количеству циклов нагружения до начала разрушения), определенному при стендовых испытаниях во ВНИИЖТе полнопрофильных рельсовых отрезков длиной 1200 мм на циклический изгиб. Стендовые испытания производили на гидropульсаторе по методике ВНИИЖТ. Максимальная сосредоточенная циклическая нагрузка, прикладываемая к отрезку посередине пролета между опорами, составляла 45 и 50 тс/сечение при асимметрии цикла нагружения  $R = 0,1$ . Испытания рельсовых отрезков на цикли-

ческий изгиб осуществляли по двум схемам нагружения: головкой в зоне растяжения и подошвой в зоне растяжения.

Температуру на поверхности элементов профиля рельсов определяли при помощи радиационных пирометров Termpoint 80 с пределом измерения  $-60...1600^{\circ}\text{C}$  и Смотрович 4П-05 с пределом измерения  $200...900^{\circ}\text{C}$  при погрешности не более 1,5%.

При проведении исследований в промышленных условиях для определения зависимости параметров рельсов от технологических факторов термической обработки использовали регрессионный анализ. При этом обработке подвергали данные не менее 50 замеров. Оптимизацию технологических параметров по полученным зависимостям проводили на ПЭВМ путем использования пакета прикладных программ.

### 3. Расчет теплового поля и напряженного состояния рельсов при их термическом упрочнении

В случае термического упрочнения железнодорожных рельсов с печного нагрева поверхность катания головки движущегося в закалочном агрегате рельса охлаждается струями воды, истекающими через отверстия в крышках струевых аппаратов. Отверстия в крышках расположены поперечными рядами. Расстояние между отверстиями в ряду выбирается с таким расчетом, чтобы соответствующие им зоны охлаждения на поверхности головки рельса соединялись. Для таких зон ввиду малой скорости истечения воды из отверстий можно принять, что теплоотдача с участка поверхности головки соответствующего одному ряду такая же, как и при охлаждении в спокойной воде.

Расстояние между поперечными рядами отверстий в крышке струевого аппарата можно выбрать и таким, чтобы зоны охлаждения водой поверхности головки над соседними рядами отверстий не сливались. В этом случае участок поверхности головки рельса между струями воды будет охлаждаться на воздухе, то есть будет происходить чередование охлаждения водой и охлаждения на воздухе. Следовательно, средняя теплоотдача от поверхности головки при таком охлаждении будет иметь промежуточное значение между охлаждением водой и охлаждением на воздухе, а изменяя расстояние между поперечными рядами отверстий в крышке струевого аппарата, можно регулировать интенсивность охлаждения поверхности головки рельса при перемещении его в закалочном агрегате.

Решая уравнение сохранения количества тепла, отданного воде и воздуху поверхностью головки рельса, получаем выражение

$$\xi = \frac{\alpha_{вз} - \sqrt{\alpha_{тр}(\alpha_{вд} + \alpha_{вз}) - \alpha_{вд}\alpha_{вз}}}{\alpha_{вз} - \alpha_{вд}}$$

которое характеризует зависимость необходимого расстояния между рядами отверстий в крышке струевого аппарата от коэффициента теплоотдачи  $\alpha_{тр}$ , обеспечивающего заданные условия охлаждения, и коэффициентов теплоотдачи воде  $\alpha_{вд}$  и воздуху  $\alpha_{вз}$  в данный момент времени.

Условия охлаждения поверхности головки рельса, обеспечивающие формирование требуемой структуры в упрочненном слое, задавали по термодинамической диаграмме превращения аустенита рельсовой стали при охлаждении. В этом случае для определения требуемого коэффициента теплоотдачи, обеспечивающего заданные условия охлаждения, необходимо решить дифференциальное уравнение теплопроводности. В настоящее время задачи теории теплопроводности эффективно решаются численными методами, в частности, достаточно универсальным методом конечных разностей. Для математического моделирования тепловых процессов, происходящих в рельсе при его термической обработке, а также анализа его напряженного состояния, использовали решение двумерного уравнения теплопроводности по явной разностной схеме с переменными шагами по координатам. Сечение рельса рассматривали в виде семи расчетных блоков.

Напряжения, возникающие при термической обработке металлов, можно разделить на два вида; на сопутствующие процессу термической обработки (временные, термические) и на оставшиеся в изделии после завершения термического воздействия (остаточные). Эти напряжения возникают вследствие неодновременного изменения объемов по сечению тела, происходящего в результате чисто теплового сокращения при охлаждении (температурные напряжения), и вследствие неодновременного и неоднородного изменения удельных объемов, вызванных структурными превращениями (фазовые и структурные напряжения).

При решении задачи о вычислении напряжений в процессе охлаждения тела на каждом этапе расчета напряжений необходимо учитывать непрерывные температурные изменения модуля упругости, предела текучести,

коэффициента температурного расширения и других теплофизических характеристик металла, неодновременности и неоднородности структурных деформаций по сечению тела. При термической обработке необходимо учитывать также и влияние на предел текучести металла непрерывно изменяющегося структурного состояния исследуемого тела. Величина относительного свободного удлинения при превращении аустенита в перлит может быть определена путем аппроксимации термокинетической диаграммы рельсовой стали и кривой изменения температуры в данной точке сечения тела, или в интервале температур перлитного превращения полное свободное удлинение перлита рельсовой стали может быть принято равным 1% для линейного и 3% для объемного расширения.

На основании изложенного разработана программная система для расчета на персональной ЭВМ двумерных температурных полей и напряженного состояния при термической обработке рельсов.

Прямолинейность рельса при термическом упрочнении будет обеспечена при условии равенства изгибающих моментов со стороны головки и со стороны подошвы относительно главной горизонтальной оси сечения его профиля. Поэтому, для выбора оптимальной продолжительности охлаждения поверхности подошвы, обеспечивающей относительное равенство изгибающих моментов со стороны головки и подошвы рельса, варьировали интенсивностью охлаждения подошвы и интервале 0,3...0,8 интенсивности охлаждения головки в данный момент времени.

Расчетом по разработанной методике установлено, что для обеспечения прямолинейности выхода рельса Р50 из термической установки при равенстве продолжительностей охлаждения подошвы и головки интенсивность охлаждения подошвы должна составлять 0,4...0,5 интенсивности охлаждения головки. При интенсивности охлаждения подошвы, равной 0,7...0,8 интенсивности охлаждения головки, продолжительность охлаждения подошвы должна составлять 30...20 секунд. Для обеспечения формирования однородной микроструктуры по сечению упрочненного слоя металла головки на расстоянии до 20 мм от поверхности катания расчетное расстояние между рядами отверстий в крышках струевых аппаратов должно изменяться от 67 мм в начальный момент до 20 мм в конце охлаждения.

#### 4. Экспериментальная проверка и определение оптимального режима термического упрочнения рельсов

Экспериментальную проверку полученных на основании расчетов режимов термического упрочнения проводили в два этапа:

- опробование технологии поверхностной термической обработки головки рельсов с одновременным охлаждением подошвы, обеспечивающей прямолинейность рельса при выходе его из рельсозакалочного агрегата;
- совершенствование режимов охлаждения поверхности катания головки с целью получения однородной микроструктуры по глубине термоупрочненного слоя металла головки.

Опробование технологии термического упрочнения поверхности головки рельсов с одновременным охлаждением нижней поверхности их подошвы производили на 30-ти рельсах трех плавков. Охлаждение поверхности катания головки рельсов осуществляли в соответствии с принятыми на комбинате режимами термической обработки, а охлаждение подошвы производили водой, распыленной при помощи форсунок с продолжительностью охлаждения 8...10, 12...15 и 17...23 секунды.

Установлено, что охлаждение водой поверхности подошвы в течение 17... 23 секунд позволяет получать рельсы с требуемой прямолинейностью. При продолжительности охлаждения подошвы 10...15 секунд для обеспечения прямолинейности рельса необходим его изгиб на головку в гибочной машине, однако продолжительность операции гибки в сравнении с существующей технологией сокращается с 30...45 сек до 20 сек.

Путем регрессионного анализа результатов исследований были получены зависимости изменения температуры нижней поверхности подошвы и стрелы прогиба рельсов после их окончательного охлаждения от продолжительности охлаждения подошвы водой:

$$T = 778,9911 \exp(-0,01662 t)$$

при коэффициенте корреляции 0,987  
и среднеквадратичной ошибке 9,467°C

$$f = -554,0175 + 25,9617 t$$

при коэффициенте корреляции 0,644  
и среднеквадратичной ошибке 205,51 мм

где  $T$  - температура поверхности подошвы, °C;

$f$  - стрела прогиба рельсов, мм;

$t$  - продолжительность охлаждения подошвы, сек.

Установлено, что охлаждение водой нижней поверхности подошвы рельса одновременно с термическим упрочнением поверхности катания его головки приводит к снижению уровня растягивающих остаточных напряжений. Существенное снижение растягивающих напряжений наблюдается при продолжительности охлаждения подошвы 10..12 секунд, а увеличение продолжительности охлаждения подошвы более 17 секунд приводит к возникновению в рельсах сжимающих остаточных напряжений. Путем регрессионного анализа результатов стандартного определения уровня остаточных напряжений получена зависимость изменения ширины паза от продолжительности охлаждения подошвы водой:

$$h = 2,1938 - 0,1232 t$$

при коэффициенте корреляции 0,942

и среднеквадратичной ошибке 0,273 мм

где  $h$  - изменение ширины паза, мм;

$t$  - продолжительность охлаждения подошвы, сек.

Исследование распределения остаточных напряжений по поверхности элементов профиля рельса показывает, что в рельсах, термоупрочненных без охлаждения подошвы, эпюра остаточных напряжений менее благоприятна, чем у рельсов, термоупрочненных с охлаждением подошвы. Так на поверхности катания головки этих рельсов выявлены растягивающие напряжения до 90 МПа, на поверхности шейки - напряжения сжатия до 120 МПа, на нижней поверхности подошвы - напряжения растяжения до 90 МПа в средней части и напряжения сжатия до 80 МПа у боковой кромки.

В рельсах, термоупрочненных с охлаждением водой подошвы, эпюры распределения остаточных напряжений при продолжительности охлаждения нижней поверхности подошвы более 10 секунд эпюры остаточных напряжений имеют оптимальный вид: на поверхности катания головки формируются сжимающие напряжения до 90 МПа при продолжительности охлаждения 11 секунд и до 190 МПа при продолжительности охлаждения 23 секунды. На поверхности шейки возникают напряжения сжатия до 80 и 130 МПа соот-

ветственно, а на нижней поверхности подошвы, соответственно, напряжения растяжения до 90 и 130 МПа в средней части и напряжения сжатия до 40 МПа у боковой кромки.

С целью совершенствования режимов охлаждения поверхности катания головки, обеспечивающих получения однородной микроструктуры по глубине термоупрочненного слоя металла головки и для изучения характера превращения аустенита рельсовой стали при охлаждении поверхности катания головки рельса водой после печного нагрева экспериментально определяли зависимость изменения температуры металла при термическом упрочнении рельсов Р50 по существующему и предложенному режимам в точках на расстоянии 1,0...1,5, 5, 10 и 20 мм от поверхности катания головки по оси симметрии профиля рельса.

Установлено, что при существующем режиме охлаждения неоднородность распределения микроструктур по глубине упрочненного слоя металла головки вызывает высокая скорость охлаждения водой ее поверхности катания (более 50 град./с на расстоянии 1...1,5 мм от поверхности), тогда как для гарантированного получения однородной микроструктуры по глубине упрочненного слоя металла головки необходима скорость охлаждения ее поверхности не более 40 град./с.

Совершенствование режимов охлаждения поверхности головки путем изменения шага между соплами в крышках струевых аппаратов существенно повысило однородность микроструктуры по сечению упрочненного слоя металла, однако наличие прерывистого охлаждения поверхности головки, особенно в начальный период, не позволили в полной мере устранить неоднородность распределения микроструктур.

Дальнейшее совершенствование режимов охлаждения поверхности катания головки производили по пути применения водо-воздушной смеси в начальный период охлаждения (в течение 8...12 секунд), которая при определенном соотношении расходов воды и воздуха обеспечивает необходимую скорость охлаждения для получения однородной микроструктуры в упрочненном слое металла головки, а формирование необходимой направленности факелов охлаждающей смеси практически полностью исключает прерывистость охлаждения в начальный период охлаждения поверхности головки.

Установлено, что применение водо-воздушной смеси для охлаждения поверхности головки в начальный период охлаждения позволило получить однородную микроструктуру тонкодисперсного перлита с пластинчатой

формой карбидной фазы по сечению упрочненного слоя металла головки на расстоянии до 15 мм от поверхности.

#### 5. Свойства железнодорожных рельсов, термоупрочненных по новой технологии. Результаты стендовых испытаний

При внедрении в производство технологического процесса термического упрочнения водой поверхности катания головки при одновременном охлаждении водой нижней поверхности их подошвы после печного нагрева изучение комплекса свойств и оценку качества рельсов, термоупрочненных по новым режимам, производили во ВНИИЖТе на полнопрофильных пробных отрезках, вырезанные от термообработанных в производственных условиях и подвергнутых правке в холодном состоянии рельсов трех плавок. Термическое упрочнение поверхности катания головки рельсов осуществляли путем сочетания охлаждения поверхности головки водо-воздушной смесью в начальный период охлаждения и дальнейшим охлаждением водой при помощи существующих охлаждающих устройств. Для сравнения свойств у части рельсов упрочнение поверхности головки производили по существовавшим на комбинате режимам. Охлаждение поверхности подошвы производили водой по одному из двух режимов, различающихся продолжительностью охлаждения: 10...12 и 20...24 секунды. После выхода из рельсоакалочного агрегата все рельсы подвергали изгибу в гибочной машине. Холодную правку в роликоправильной машине и доправку их в штемпельных прессах производили по существующим на комбинате режимам правки.

Твердость по сечению термоупрочненного металла головки рельсов при использовании водо-воздушной смеси в начальный период охлаждения достаточно однородна на расстоянии до 15 мм от поверхности катания и находится на уровне 38...39 HRC. По мере дальнейшего удаления от поверхности твердость постепенно снижается. Микроструктура от поверхности катания представляет собой тонкодисперсную структуру с пластинчатой формой карбидной фазы, дисперсность которой по мере удаления от поверхности головки уменьшается и на расстоянии 25...30 мм данная микроструктура переходит в сорбитообразный перлит и перлит, характерный для нормализованного состояния.

Твердость у поверхности катания головки рельсов, термоупрочненных по существовавшим режимам, достигает 40 HRC, на расстоянии

5...8 мм твердость снижается до 37 НRc. В более глубоких слоях упрочненной головки твердость вновь возрастает до 38...39 НRc и затем постепенно снижается по мере удаления от поверхности. Конечная микроструктура упрочненного слоя металла головки вблизи поверхности катания и на расстоянии до 4...6 мм от поверхности представляет собой троост-сорбит или сорбит отпуска. На расстоянии 4...8 мм микроструктура представлена структурой отпущенного бейнита. При дальнейшем удалении от поверхности катания микроструктура представлена мелкодисперсным перлитом с тонкопластинчатой формой карбидной фазы, дисперсность пластин которой постепенно уменьшается по мере удаления от поверхности.

Сопоставление распределения твердости по глубине термоупрочненного слоя металла подошвы показывает, что в зависимости от продолжительности охлаждения и содержания углерода в стали твердость у поверхности достигает 31...34 НRc (при продолжительности охлаждения 20...24 с) или 29 НRc (при продолжительности охлаждения 10...12 с), которая по мере удаления от поверхности постепенно снижается. При продолжительности охлаждения подошвы 20...24 с наблюдается "провал" твердости на расстоянии 4...8 мм, а глубина упрочненного слоя металла достигает 14...16 мм. При продолжительности охлаждения подошвы 10...20 с понижения твердости не наблюдается и глубина проникновения термического влияния достигает 10...12 мм.

Микроструктура упрочненного слоя металла подошвы состоит из участков сорбита отпуска и мелкодисперсной структуры перлита (сорбита закалки), количественное соотношение которых на данной точке сечения подошвы зависит от продолжительности охлаждения подошвы и расстояния от нижней поверхности подошвы до этой точки. При продолжительности охлаждения подошвы 20...24 с микроструктура на расстоянии до 4 мм от поверхности представляет сорбит отпуска и мелкодисперсный перлит на расстоянии от 4 до 6 мм, который при дальнейшем удалении от поверхности постепенно переходит в перлитную структуру нормализованного состояния. При продолжительности охлаждения 10...12 с микроструктура в основном представлена мелкодисперсной структурой перлита с локальными участками сорбита отпуска, которая по мере удаления от поверхности постепенно переходит в перлитную структуру нормализованного состояния.

Сопротивление усталостному разрушению оценивали по уровню долговечности при циклическом изгибе, определенному при стендовых испы-

таниях полнопрофильных рельсовых отрезков на гидропульсаторе. При испытаниях на циклический изгиб рельсовых отрезков головкой в зоне растяжения на уровень долговечности основное влияние оказывает содержание углерода в стали и уровень внутренних остаточных напряжений. Большая продолжительность охлаждения подошвы обеспечивает получение более высоких значений долговечности при циклическом изгибе как при нагрузке 50 тс/сечение, так и 45 тс/сечение.

При испытании исследуемых рельсов подошвой в зоне растяжения на результаты усталостных испытаний оказывали влияние содержание углерода в стали и особенности структуры упрочненного слоя металла подошвы, в котором при данной схеме нагружения возникал очаг усталостного разрушения и росла усталостная трещина. Однако значимого влияния продолжительности охлаждения подошвы на значения долговечности при такой схеме циклического нагружения не установлено.

При определении уровня остаточного напряженного состояния исследуемых рельсов по стандартной методике было установлено, что ширина продольной прорези по шейке рельсового отрезка уменьшалась в зависимости от продолжительности термического воздействия на подошву. При продолжительности охлаждения подошвы 10...12 с - уменьшение прорези во всех исследуемых рельсах составило 0,1 мм, а при продолжительности охлаждения 20...24 с - уменьшение прорези равнялось 0,55 мм.

Распределение остаточных напряжений по поверхности элементов профиля рельса также показало, на положительное влияние технологической операции охлаждения подошвы водой. Независимо от способа охлаждения поверхности катания головки при термическом упрочнении в ней формируются сжимающие остаточные напряжения. С увеличением продолжительности охлаждения подошвы с 10...12 с до 20...24 с сжимающие остаточные напряжения на поверхности катания головки возрастают с 85...95 до 110...115 МПа, а сжимающие остаточные напряжения в шейке при этом возрастают с 95...100 до 125...135 МПа. В средней части подошвы исследуемых рельсов возникают растягивающие остаточные напряжения, величина которых при увеличении продолжительности охлаждения подошвы возрастает с 90...100 до 110...115 МПа. На боковых кромках подошвы наблюдаются сжимающие остаточные напряжения небольшой величины.

Исследование распределения остаточных напряжений по сечению профиля рельса в состоянии поставки при термическом упрочнении с применением водовоздушной смеси в начальный период охлаждения, произведе-

денное путем разрезки на продольные бруски, показывает, что значения и знак напряжений в приповерхностных брусках довольно точно совпадают с напряжениями на поверхности. Так у поверхности катания головки и ее боковых граней после холодной правки возникают сжимающие остаточные напряжения порядка 90... 120 МПа. По мере удаления от поверхности в направлении к центру головки сжимающие напряжения уменьшаются и трансформируются в растягивающие, максимальное значение которых наблюдается в месте между центром головки и зоной перехода головки к шейке. В шейке наблюдаются сжимающие напряжения, максимальное значение которых в большинстве случаев приходится на ее среднюю часть по высоте, или несколько смещено к подошве. В зоне перехода шейки к подошве сжимающие напряжения переходят в растягивающие, максимальное значение которых наблюдается в средней части ширины подошвы.

Следовательно, применение технологической операции охлаждения водой нижней поверхности подошвы при термическом упрочнении поверхности головки рельса приводит к тому, что в головке рельсов в состоянии поставки создаются благоприятные сжимающие остаточные напряжения.

Сопоставляя основные свойства термоупрочненных рельсов производства Днепровского меткомбината после внедрения новых режимов термического упрочнения и свойства рельсов, термообработанных другими способами, можно сделать вывод, что рельсы производства ДМК по основным показателям не уступают рельсам производства других предприятий.

Так средние значения твердости на поверхности катания головки рельсов, термообработанных различными способами, близки между собой, однако имеют место существенные различия в распределении твердости и микроструктуры по сечению упрочненного слоя металла. Для объемнонакаленных в масле рельсов характерно плавное снижение твердости и дисперсности перлита от поверхности к центру головки, причем на расстоянии до 15...20 мм от поверхности катания значения твердости примерно одинаковы. Для термоупрочненных рельсов с нагрева ТВЧ одинаковые значения твердости и однородная микроструктура распространяются на глубину до 11...13 миллиметров, а для упрочненных рельсов после печного нагрева с применением водо-воздушной смеси в начальный период охлаждения - до 15 мм.

Все способы термического упрочнения обеспечивают примерно одинаковые прочностные характеристики рельсов при испытании на растяжение. При испытании на ударный изгиб наибольшие значения ударной вяз-

кости присущи термоупрочненному слою металла у рельсов, подвергнутых поверхностному упрочнению как с нагрева ТВЧ, так и после печного нагрева.

Каждый способ термической обработки рельсов оказывает характерное влияние на распределение остаточных напряжений по сечению профиля рельса. Так в объемнозакаленных в масле рельсах в состоянии поставки у поверхности катания головки наблюдаются растягивающие остаточные напряжения до 100 МПа, которые достигают наибольшего значения (около 150 МПа) в центральной части головки. В шейке преобладают сжимающие напряжения до 150 МПа, а в зоне перехода от шейки к подошве сжимающие остаточные напряжения трансформируются в растягивающие, максимальное значение которых (до 250 МПа) приходится на среднюю часть подошвы. На кромок подошвы преобладают сжимающие напряжения до 60 МПа.

При поверхностной термической обработке рельсов, как с печного нагрева (применение водо-воздушной смеси в начальный период охлаждения поверхности головки), так и с нагрева ТВЧ в головке и шейке профиля рельса в основном преобладают сжимающие остаточные напряжения до 150 МПа, однако в зоне перехода от шейки к подошве и средней части подошвы возникают растягивающие остаточные напряжения до 130 МПа.

Получение в головке рельсов сжимающих остаточных напряжений приводит к повышению предела выносливости, увеличению числа циклов нагружения до зарождения усталостных трещин, а также до полного излома рельса, увеличению критического размера усталостной трещины и повышению живучести термоупрочненных рельсов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На Днепровском металлургическом комбинате на основании теоретических расчетов и экспериментальных исследований разработаны и внедрены в производство новые режимы термического упрочнения поверхности катания головки рельсов по всей длине с одновременным охлаждением нижней поверхности их подошвы, обеспечившие повышение качественных характеристик термоупрочненных рельсов и их конструкционной прочности.

2. Разработан и предложен механизм управления напряженным состоянием в рельсах при термическом упрочнении поверхности их головки с

одновременным ускоренным охлаждением нижней поверхности подошвы. Установлено, что на знак и величину изгибающего момента от внутренних напряжений по сечению профиля рельса, а также на прямолинейность рельса при его выходе из термической установки влияют интенсивность и продолжительность охлаждения поверхности подошвы. Показано, что охлаждение поверхности подошвы при соотношении интенсивностей охлаждения подошвы и головки равном  $0,7 \dots 0,8$  в течение  $17 \dots 23$  секунд, позволяет получать рельсы с требуемой прямолинейностью без их изгиба в гибочной машине. При продолжительности охлаждения подошвы  $10 \dots 15$  секунд изгиб рельса в гибочной машине обязателен, однако продолжительность операции гибки в сравнении с существующей технологией резки сокращается с  $30 \dots 45$  до  $20$  секунд. Это позволило повысить часовую производительность участка термической обработки рельсов рельсобалочного цеха Днепровского меткомбината с  $19,3$  до  $22,2$  т/час.

3. Установлено, что применение технологической операции охлаждения нижней поверхности подошвы одновременно с термическим упрочнением поверхности головки приводит к тому, что в упрочненных рельсах в состоянии поставки снижается уровень растягивающих остаточных напряжений. Так при продолжительности охлаждения нижней поверхности подошвы более  $10$  секунд эпюры остаточных напряжений имеют оптимальный вид: на поверхности катания головки формируются сжимающие напряжения до  $90$  МПа при продолжительности охлаждения  $12$  секунд и до  $190$  МПа при продолжительности охлаждения  $23$  секунды. На поверхности шейки возникают напряжения сжатия до  $80$  и  $130$  Мпа соответственно, а на нижней поверхности подошвы, соответственно, напряжения растяжения до  $90$  и  $130$  МПа в средней части и напряжения сжатия до  $40$  МПа у боковой кромки.

4. Показано, что продолжительность охлаждения нижней поверхности подошвы существенно влияет на формирование микроструктуры в ней. При продолжительности охлаждения подошвы до  $10 \dots 12$  секунд микроструктура от поверхности образцов без существенных изменений и представляет собой перлитную структуру с пластинчатой формой карбидной фазы. Увеличение продолжительности охлаждения подошвы до  $14 \dots 15$  секунд приводит к формированию у нижней поверхности подошвы рельса частично упрочненного слоя металла глубиной до  $8$  мм, микроструктура которого представляет собой сорбитообразный перлит, переходящий по мере удаления от поверхности в перлит. При продолжительности охлаждения подошвы  $16 \dots 23$  секунды глубина зоны упрочнения в подошве увеличилась до

10...12 мм и характеризуется формированием микроструктуры сорбита отпуска на расстоянии до 4 мм от поверхности и сорбита закалки с пластинчатой формой карбидной фазы, переходящего в перлит нормализованного состояния.

5. Установлено, что неоднородность распределения микроструктур по глубине термоупрочненного слоя металла головки рельсов вызывает высокая скорость охлаждения водой поверхности катания головки рельса, которая превышает 40 град./с. Предложен способ управления кинетикой превращений при термическом упрочнении железнодорожных рельсов Р50, основанный на изменении в широких пределах условий охлаждения поверхности головки и обеспечивающий получение однородной микроструктуры по глубине упрочненного слоя металла на расстоянии до 15 мм от поверхности. Совершенствование условий охлаждения поверхности головки рельса было проведено путем изменения конструкции охлаждающих устройств по двум направлениям: выбор оптимального расстояния между поперечными рядами сопел (отверстий) в крышках существующих струевых аппаратов, и путем сочетания охлаждения поверхности головки рельса водо-воздушной смесью продолжительностью 8...12 секунд в начальный период охлаждения с дальнейшим охлаждением водой при помощи существующих охлаждающих устройств.

6. Новые режимы охлаждения поверхности головки с оптимальным расстоянием между рядами сопел в крышках струевых аппаратов существенно повысили однородность микроструктуры по сечению упрочненного слоя металла на расстоянии до 15 мм от поверхности катания головки. Однако наличие прерывистого охлаждения поверхности головки (с относительно продолжительной паузой), особенно в начальный период, не позволяет в полной мере устранить неоднородность распределения микроструктуры. Микроструктура у поверхности катания головки и на расстоянии до 5...8 мм от поверхности представляет собой тонкодисперсную перлитную структуру с пластинчатой формой карбидной фазы с локальными участками структур отпуска, плотность которых по мере удаления от поверхности уменьшается. При дальнейшем удалении от поверхности катания головки микроструктура полностью представляет собой тонкодисперсный перлит, переходящий по мере удаления в сорбитообразный перлит и перлит с пластинчатой формой карбидной фазы, характерного для нормализованного состояния.

7. Режимы охлаждения поверхности головки рельсов с применением

в начальный период охлаждения водо-воздушной смеси обеспечили формирование однородной микроструктуры по сечению упрочненного слоя металла головки. Так в приповерхностных слоях металла головки и на глубине до 15 мм микроструктура представлена тонкодисперсной структурой перлита с пластинчатой формой карбидной фазы (троостит и сорбит закалки), дисперсность пластин которой по мере дальнейшего удаления от поверхности уменьшается. На расстоянии 25...30 мм от поверхности катания данная микроструктура переходит в перлитную структуру нормализованного состояния.

8. Установлено, что на уровень долговечности при испытаниях на циклический изгиб полнопрофильных рельсовых отрезков головкой в зоне растяжения основное влияние оказало содержание углерода в стали и уровень внутренних остаточных напряжений. Увеличение продолжительности охлаждения подошвы обеспечивает получение более высоких значений долговечности как при нагрузке 50 тс/сечение, так и 45 тс/сечение, а именно с 231,7 и 350 тыс. циклов до 253 и 485,4 тыс. циклов соответственно. При испытании рельсов подошвой в зоне растяжения на результаты усталостных испытаний оказали влияние содержание углерода в стали. Существенного влияния продолжительности охлаждения поверхности подошвы на долговечность при данной схеме нагружения не выявлено.

9. По результатам проведенных исследований и опробования технологического процесса термического упрочнения водой поверхности катания головки рельсов после печного нагрева с одновременным охлаждением нижней поверхности подошвы были разработаны и внедрены в производство новые технические условия ТУ 14-2-674 "Рельсы железнодорожные широкой колеи типа Р50 из кислородно-конвертерной стали с закалкой поверхности катания головки по всей длине", по которым потребителям отгружено более 300 тыс. тонн термоупрочненных рельсов.

10. Разработанный способ термической обработки поверхности головки рельсов с одновременным охлаждением его подошвы применим и при термической обработке рельсов с использованием тепла прокатного нагрева. Это свойство в настоящее время чрезвычайно дефицита энергоносителей, и в первую очередь природного газа, имеет немаловажное значение. В этом случае необходимо проведение исследований для определения свойств термоупрочненных рельсов, так как на них будет оказывать влияние колебание температуры перед термической обработкой и характер структурного состояния металла рельсов после прокатки.

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:

1. Исследование и внедрение новой технологии поверхностной закалки рельсов с подстуживанием подошвы на Днепровском металлургическом комбинате им. Дзержинского / Ермолаев В. Н., Мильман Е. А., Изюмский В. А., Летко Т. И. // Повышение качества железнодорожных рельсов и колес: Отраслевой сборник научных трудов - Харьков: Изд. УкрНИИМета, 1987. - с. 33-34.

2. Новый технологический процесс термического упрочнения поверхности катания головки железнодорожных рельсов с подстуживанием подошвы / Изюмский В. А. // Современное оборудование и технология термической и химико-термической обработки металлических материалов: Материалы семинара - Москва: Московский Дом научно-технической пропаганды им. Ф. Э. Дзержинского, 1989. - с. 44-49.

3. А. с. N 1239170 СССР, МКИ С21D/04. Способ термической обработки рельсов / Ермолаев В. Н., Чернов Е. И., Левченко Н. Ф., Мильман Е. А., Изюмский В. А. и др.; УкрНИИМет (СССР). - N 3807465/22-02, Заявл. 29.10.84.

4. А. с. N 1399360 СССР, МКИ С21D/04. Способ термообработки рельсов / Мильман Е. А., Гончаренко С. Г., Изюмский В. А.; Днепровский металлургический комбинат им. Дзержинского (СССР). - N 4159881/23-02, Заявл. 30.05.88.



1825150

# АВ 29.758

10. Разработана способ термической обработки поверхности головки рельса, заключающийся в охлаждении его подложки временем и термической обработке рельсов с использованием тепла пружинного нагнетания. Это позволяет в кратчайшие сроки устранить дефекты, возникающие в первую очередь при прокатке, а именно: растрескивание, образование трещин, в этом случае необходимо применение исследований для определения свойств термупрочных рельсов, так как во них будет оказывать влияние изменение температуры перед термической обработкой и термическое состояние металла рельса после прокатки.