На правах рукописи

Неклюдов Алексей Николаевич

ОЦЕНКА КИНЕТИКИ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ И СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ НАПЛАВКОЙ КОЛЕС ВАГОНОВ С РАЗНОЙ СТЕПЕНЬЮ ИХ ИЗНОШЕННОСТИ

Специальность 05.03.06. – Технологии и машины сварочного производства

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2004

Работа выполнена в Московском государственном университете путей сообщения (МИИТ)

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор **Киселев С.Н.**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор **Куркин А.С.**
кандидат технических наук **Павлов Н.В.**

Ведущая организация - ЗАО Тверской институт вагоностроения

Защита состоится «23» декабря 2004 г. на заседании диссертационного совета Д212.141.01 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Ваш отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный печатью организации, просим высылать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомится в библиотеке МГТУ имени Н.Э. Баумана.
Телефон для справок: 267-09-63

Автореферат разослан «22» ноября 2004 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент А.В. Коновалов

104

НТБ МГТУ им.Н.Э.Баумана
1698503
Неклюдов А.Н. Оценка кинет
-504
НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

ЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

ть темы. Безотказность подвижного состава определяется эксплуатационными характеристиками всех основных элементов конструкции и в первую очередь ходовых частей. Одним из главных элементов ходовых частей вагона является колесная пара, которая направляет движение по рельсовому пути, обеспечивает передачу горизонтальных и вертикальных усилий между кузовом вагона и рельсовой колеей. Существенное увеличение, в последние годы, объема работ по восстановлению и упрочнению колес привело к необходимости разработки и совершенствования технологических процессов, а также глубокого научного обоснования основных параметров этих процессов с позиции обеспечения необходимого уровня безопасности эксплуатации подвижного состава. Проблема повышения ресурса такого ответственного и металлоемкого конструктивного элемента, каким является колесо вагона, находится в центре внимания специалистов, обеспечивающих надежную работу транспорта во всем мире.

Одним из наиболее широко распространенных на сети ж.д. России методов восстановления гребней цельнокатаных колес грузовых вагонов (ЦКК) является однодуговая наплавка, предполагающая целый ряд этапов изменения теплового состояния обода колеса в процессе восстановления: предварительный подогрев обода колеса, многопроходная наплавка гребня, охлаждение колеса после наплавки. Качество восстановления гребней и безотказность колес в эксплуатации в значительной мере определяются основными параметрами технологического процесса наплавки, которые в свою очередь зависят от геометрии восстанавливаемого колеса – степени изношенности обода и гребня. Известны работы, связанные с обоснованием параметров технологических процессов наплавки гребня, однако, остается не исследованным вопрос о влиянии степени изношенности обода и гребня ЦКК на тепловые процессы и структурообразование при наплавке.

Существенные проблемы при реализации технологии восстановления гребней колес наплавкой заключаются в том, что даже при незначительных отклонениях в некоторых параметрах технологического процесса в колесной стали марки 2 возможно возникновение закалочных структур и в условиях сложного напряженного состояния образование микротрещин, которые не могут быть зафиксированы существующими методами контроля, а в эксплуатации приводят к разрушению. Причем последующие операции, связанные с повторными нагревами могут приводить к благоприятному изменению структуры и снижению напряжений, что не снимает проблемы возникновения разрушения от ранее образовавшейся трещины. Это реальная проблема, связанная с возникновением трещин при наплавке гребней колес. Такие процессы могут быть подвергнуты анализу только на основе компьютерного моделирования всей последовательности тепловых воздействий и структурообразования с учетом всех параметров технологического процесса. На

создание условий для решения вышеуказанных проблем и направлена излагаемая работа.

Анализ кинетики тепловых процессов и структурных превращений в ЦКК при наплавке целесообразно проводить на основе проведения компьютерного моделирования тепловых процессов и структурных превращений в колесе на всех этапах технологического процесса на базе фундаментальных положений теории сварочных процессов и решения нелинейных, нестационарных задач теплопроводности.

В связи с этим проблема оценки кинетики тепловых процессов и структурных превращений при восстановлении наплавкой цельнокатаных колес вагонов с учетом степени изношенности обода колеса и гребня является актуальной.

Цель работы и задачи исследования. Целью диссертационной работы является совершенствование технологического процесса восстановления наплавкой гребней ЦКК вагонов на основе компьютерного моделирования и экспериментального исследования тепловых процессов и структурообразования в ОШЗ с учетом степени изношенности обода и гребня.

На основе проведенного анализа состояния вопроса, характера эксплуатационных повреждений, методов восстановления, расчетной и экспериментальной оценки тепловых процессов и структурообразования в ходе исследований сформулированы и решены следующие задачи:

1. Проведение анализа повреждаемости ЦКК в эксплуатации, способов восстановления, методов расчетной и экспериментальной оценки тепловых процессов и структурообразования.
2. Разработка методики и программного обеспечения, проведение анализа кинетики тепловых процессов и структурных превращений при наплавке ЦКК грузовых вагонов с учетом изменения геометрии колеса вследствие изнашивания.
3. Разработка методики анализа структурного состава в ОШЗ при решении задач в нестационарной постановке на основе использования серии диаграмм анизотермического распада аустенита (АРА) в координатах $T\text{-}w_{8/7}$.
4. Разработка методики перестроения диаграмм АРА в координатах $T\text{-}w_{6/5}$ в координаты $T\text{-}w_{8/7}$.
5. Разработка методики компьютерного моделирования кинетики структурообразования при незавершенности структурных превращений при неоднократных нагревах и охлаждениях в процессе многопроходной наплавки.
6. Обоснование и определение следующих параметров и характеристик технологического процесса наплавки гребней ЦКК с учетом геометрических параметров обода колеса с позиции оценки структурного состава в околошовной зоне: необходимости предварительного и сопутствующего подогрева, времени предварительного подогрева, оптимального значения

температуры подогрева, интервала времени между окончанием подогрева до начала наплавки, изменение глубины проплавления и определение критерия оценки качества технологического процесса наплавки.

7. Разработка рекомендации по корректировке параметров технологии наплавки гребня ЦКК с учетом изменения геометрии колеса вследствие изнашивания.

Методы исследования. При решении поставленных задач использовались методы компьютерного моделирования тепловых процессов и структурных превращений, теории теплопереноса, теории конечно-элементного анализа, металлографических исследований; экспериментального определения температуры контактными термопарами.

Научная новизна. В диссертации получены следующие результаты, характеризующиеся научной новизной:

1. Установлены зависимости параметров технологического процесса восстановления наплавкой гребней цельнокатаных колес вагонов от степени их изношенности в эксплуатации
2. Методика анализа кинетики структурных превращений на основе использования серии диаграмм анизотермического распада аустенита для различных максимальных температур нагрева.
3. Методика перестроения диаграмм анизотермического распада аустенита из координат T-$w_{6/5}$ в координаты T-$w_{8/7}$, основанная на установлении соотношений скоростей охлаждения $w_{6/5}/w_{8/7}$ для диаграмм АРА, соответствующих различным максимальным температурам.
4. Методика анализа кинетики незавершенных структурных превращений при неоднократных нагревах и охлаждениях в процессе многопроходной наплавки на основе определения приращения структурных составляющих на текущем шаге решения с учетом структурного состава на предыдущем шаге решения.

Практическая ценность работы. В диссертации получены следующие результаты, характеризующие практическую ценность работы:

1. Результаты анализа кинетики тепловых процессов и структурных превращений в ОШЗ во время наплавки гребня с учетом степени изношенности ЦКК в эксплуатации.
2. Рекомендации по совершенствованию технологического процесса однодуговой наплавки гребней ЦКК.
3. Программное обеспечение для компьютерного моделирования тепловых процессов и структурных превращений в ОШЗ при восстановлении наплавкой гребней ЦКК.

Реализация и внедрение результатов работы. Рекомендации по совершенствованию технологического процесса наплавки приняты в отделение сварки ВНИИЖТ, имеется акт внедрения.

Апробация работы. Основные результаты были доложены на заседании кафедры «ТСМИ» (г. Москва, 2004 г.); на научном семинаре кафедры МТ-7 «Сварка и диагностика» МГТУ им. Баумана (г. Москва, 2004 г.); на научном семинаре лаборатории «Сварка» ВНИИЖТ (г. Москва, 2004 г.); на Всероссийской научно-технической конференции «Технология, оборудование и подготовка кадров в сварочном производстве» (г. Москва, 2003 г.); на Всероссийской с международным участием научно-технической конференции «Сварка и контроль» (г. Пермь, 2004 г.).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 6 печатных работ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованной литературы из 68 наименований. Основная часть работы изложена на 158 страницах машинописного текста, содержит 128 рисунков, 43 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава. Проведен анализ эксплуатации и повреждаемости цельнокатаных колес вагонов. Отмечается, что в последние годы значительно возрос износ ЦКК в эксплуатации. Основными причинами интенсивности износа является сужение колеи, применение профиля поверхности катания колес с уменьшенной конусностью, существенное превышение твердости рельса над твердостью колеса, возвышение наружного рельса над внутренним, изменение жесткости ж. д. полотна за счет применения железобетонных шпал. Элементами конструкции колеса являются обод, диск, ступица (рис. 1). На ободе имеется гребень, ограничивающий перемещение вагона в колее.

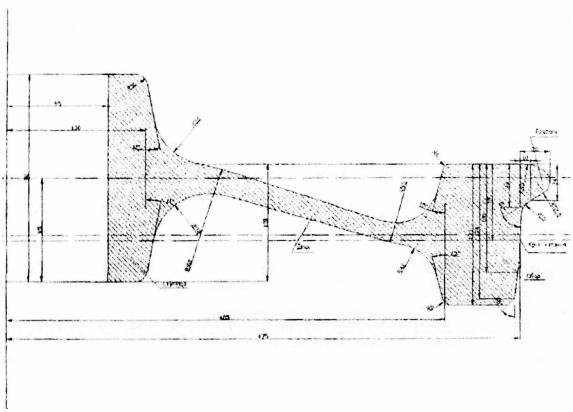


Рис. 1. Цельнокатаное колесо

В результате исследований установлено, что к 2000 г. основными причинами неисправностей колесных пар грузовых вагонов (50...55 %) является износ, остроконечный накат и подрез гребня ЦКК.

На колеса приходится значительная часть основных фондов отрасли и эксплуатационных расходов. Поэтому затраты на повышения их надежности и увеличение срока службы экономически целесообразны. Основными целями при этом являются мак-

симально возможное замедление износа гребней колес или восстановление их геометрии без уменьшения толщины обода.

Создание и внедрение технологии и оборудования для наплавки изнашиваемых гребней цельнокатаных колес вагонов является одной из основных задач развития способов восстановления колес на железнодорожном транспорте, т.к. представляет собой один из наиболее эффективных методов увеличения ресурса колесных пар. Эта проблема осложняется тем, что ЦКК изготавливается из колесной стали марки 2 по ГОСТ 10791-89, которая содержит около 0,6 % углерода и относится к сталям с ограниченной свариваемостью, что связано с возможностью образования в ОШЗ закалочных структур, растягивающих напряжений и образованием холодных трещин. В связи с этим основная концепция работы заключается в том, чтобы проанализировать процесс наплавки ЦКК с целью исключения мартенситной структуры в ОШЗ на всех стадиях процесса восстановления.

Воздействие на элементы конструкции концентрированных источников теплоты связано с протеканием комплекса взаимосвязанных процессов: интенсивного нагрева и охлаждения металла, его плавления и кристаллизации, структурных и фазовых превращений, деформирования, насыщения газами и др. Изучению процессов, связанных со сваркой и наплавкой посвящены работы многих ученых. Наибольший вклад в изучение процессов при сварке и наплавке внесли такие ученые как: Е.О. Патон, Г.А. Николаев, Н.О. Окерблом, Н.Н. Рыкалин, С.А. Куркин, О.А. Бакши, Н.Н. Прохоров, В.А. Винокуров, А.Г. Григорьянц, Г.П. Карзов, Э.Л. Макаров, В.И. Махненко, В.Ф. Демченко, Р.З. Шрон, Л.А. Копельман, А.А. Углов, Чернышов Г.Г., В.И. Труфяков, В.М. Сагалевич, В.Ф. Лукьянов, С.Н. Киселев, В.А. Судник, Н.Никол. Прохоров, А.С. Зубченко, В.А. Кархин, Б.З. Марголин, А.С. Куркин, А.С. Киселев и некоторые другие.

Однако целый ряд вопросов, связанных с реализацией технологического процесса восстановления ЦКК остается не решенным. Требуют обоснования вопросы о рациональной температуре и времени предварительного подогрева, источниках нагрева и т.д., с позиции обеспечения качества восстанавливаемых колес.

На основании проведенного анализа состояния вопроса сформулированы цель и задачи исследования изложенные выше.

Вторая глава. Приводятся основные положения разработанной методики и программного обеспечения для компьютерного моделирования кинетики тепловых процессов и структурных превращений в цельнокатаном колесе вагона, при восстановлении однодуговой наплавкой гребней под слоем флюса. На основе использования фундаментальных положений теории теплопереноса и теплообмена, а также метода конечных элементов (МКЭ) разработана методика для анализа кинетики тепловых процессов в нестационарной нелинейной постановке. Разработана методика моделирования кине-

тики структурных превращений на основе использования серии диаграмм анизотермического распада аустенита при охлаждении с различных максимальных температур ОШЗ.

Колесо вагона имеет достаточно сложную геометрию, поэтому анализ процессов теплопереноса при восстановлении наплавкой гребней целесообразно проводить на основе использования моделей колеса с высокой степенью дискретизации на конечные элементы и уточненной физической модели материала, в которой учитывается зависимость теплофизических характеристик материала, от температуры и текущего структурного состава материала конечного элемента (КЭ).

При разработке методик анализа тепловых процессов широкое применение получили численные методы, в том числе МКЭ.

Математическая модель построена на основе использования основных положений МКЭ и основного уравнения теплопроводности в цилиндрических координатах:

$$K_{rr}\cdot\frac{\partial^2 T}{\partial r^2}+\frac{K_{rr}}{r}\cdot\frac{\partial T}{\partial r}+K_{zz}\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}+Q=c\rho\cdot\frac{\partial T}{\partial t},$$

где: K_{rr}, K_{zz}, - коэффициенты теплопроводности в направлении осей;

Q – внутренний источник тепла;

$c\rho$ - коэффициент объемной теплоемкости;

T – температура.

Система дифференциальных уравнений имеет вид:

$$[c]\cdot\frac{\partial\{T\}}{\partial t}+[K]\cdot\{T\}+\{F\}=0,$$

где: $\left[k^{(e)}\right]$ - матрица теплопроводности:

$$\left[k^{(e)}\right]=\int_{A^{(e)}}\left[B^{(e)}\right]^T\cdot\left[D^{(e)}\right]\cdot\left[B^{(e)}\right]\cdot 2\cdot\pi\cdot r dA+\int_{l_2^{(e)}}h\cdot\left[N^{(e)}\right]^T\cdot\left[N^{(e)}\right]\cdot 2\cdot\pi\cdot r dl,$$

где: $[B^{(e)}]$ – матрица градиентов элемента;

$[D^{(e)}]$ – матрица теплопроводности элемента;

$[N^{(e)}]$ - вектор функций форм элемента;

h - коэффициент теплообмена;

$\left\{f^{(e)}\right\}$ - вектор тепловых нагрузок:

$$\left\{f^{(e)}\right\}=-\int_{A^{(e)}}Q\cdot\left[N^{(e)}\right]^T\cdot 2\cdot\pi\cdot r dA+\int_{l_1^{(e)}}q\cdot\left[N^{(e)}\right]^T\cdot 2\cdot\pi\cdot r dl-\int_{l_2^{(e)}}h\cdot T_\infty\cdot\left[N^{(e)}\right]^T\cdot 2\cdot\pi\cdot r dl,$$

где: q – тепловой поток на поверхности;

T_∞ – температура окружающей среды;

$\left[c^{(e)}\right]$ – матрица теплоемкости:

$$\left[c^{(e)}\right]=\int_A c\rho\cdot[N]^T\cdot[N]\cdot 2\cdot\pi\cdot r dA;$$

$\{T\}$ - вектор значений температур.

Для компьютерного моделирования тепловых процессов разработано программное обеспечение, в состав которого входит библиотека 4^{λ}, $8^{\text{ми}}$, $12^{\text{тм}}$, $16^{\text{тм}}$ и $20^{\text{тм}}$ узловых изопараметрических осесимметричных КЭ. В качестве базового КЭ при разработке моделей ЦКК для решения поставленных задач использован $4^{\text{х}}$ узловой осесимметричный конечный элемент.

Механические, технологические и служебные свойства сталей и сварных соединений в значительной мере определяются структурным составом. Нестационарные тепловые процессы, связанные с воздействием концентрированных источников теплоты, являются причиной протекания структурных превращений в металле на этапах нагрева и охлаждения. Особенность фазовых и структурных превращений при воздействии сварочных источников тепла заключается в том, что они протекают в условиях быстрого нагрева и охлаждения. Характер превращений зависит от химического состава сплава, максимальных температур нагрева и скорости охлаждения др.

В излагаемой диссертации разработана методика анализа кинетики структурных превращений при компьютерном моделировании процесса восстановления наплавкой, основанная на использования серии диаграмм анизотермического распада аустенита при охлаждении с различных максимальных температур. Оценка структурного состава на текущем шаге решения осуществляется на основе анализа максимальной температуры на этапе нагрева, скорости охлаждения в интервале температур 800-700 °С и температуры на текущем шаге, определяющей положение точки на совмещенной диаграмме, построенной на основе использования диаграмм распада аустенита при охлаждении с максимальных температур 900, 1100, 1350 °С (рис. 2).

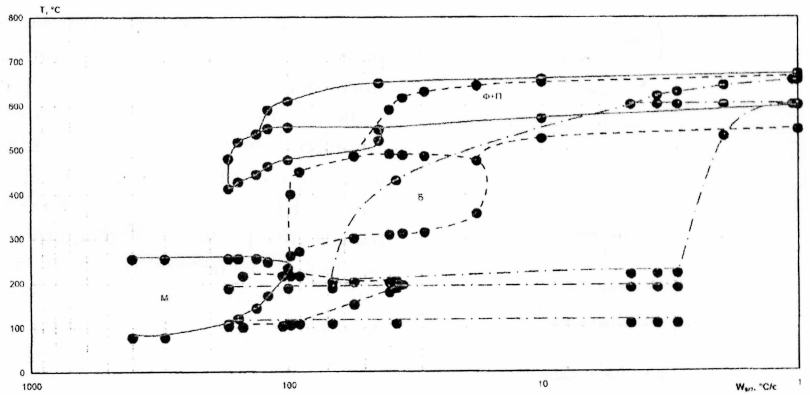


Рис. 2. Совмещенная диаграмма анизотермического распада аустенита Т – $w_{8/7\text{для}}$ колесной стали марки 2 для различных T_{max} (сплошные линии - охлаждение с 900 °С, пунктирные линии – охлаждение с 1100 °С, штрихпунктирные линии – охлаждение с 1350 °С)

Разработанная методика анализа кинетики структурного состава при повторных нагревах основана на оценке теплового состояния КЭ на текущем шаге решения и времени пребывания КЭ в соответствующем температурном диапазоне структурных превращений. Структурный состав КЭ в текущий момент времени определяется с учетом приращения температуры на текущем шаге решения, температурного диапазона соответствующего структурного превращения и структурного состава на предыдущем шаге решения.

На основе анализа современных программных средств подобного класса и уровня, при разработке программного комплекса (ПК) реализован принцип многомодульного построения, обеспечивающий возможность объединения в едином программном продукте отдельных компонентов, каждый из которых отличается значительным объемом кода и функциональным назначением. Реализован принцип поэтапной работы пользователя с ПК: составление и описание КЭ-модели, задание граничных условий и формирование банка данных по характеристикам материала, решение температурно-структурной задачи, обработка результатов с возможностью представления в числовом и графическом форматах.

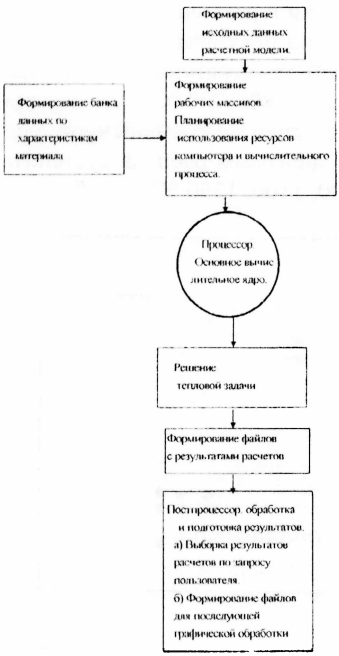


Рис. 3. Структурная схема ПК

Укрупненная структурная схема разработанного программного комплекса SANAK представлена на рис. 3.

Для проведения верификации разработанной методики и программного обеспечения выполнен сравнительный анализ результатов компьютерного моделирования и экспериментальной оценки тепловых процессов в ЦКК при закалке, опубликованных в литературе. Расхождение расчетных и экспериментальных значений температур в точках расположенных на различной глубине обода от поверхности катания колеса не превышает 15 %.

Третья глава. В третьей главе приводятся результаты компьютерного моделирования восстановления однодуговой наплавкой гребней ЦКК с учетом износа обода в эксплуатации, а также результаты экспериментального определения значений температур.

Согласно инструкции ТИ-5-02-98У на технологический процесс восстановления наплавкой основными параметрами процесса являются: I - сила тока (310 А), U –напряжение (31 В), V - скорость наплавки (22,5 м/ч), $d_{эл}$ - диаметр электродной проволоки (3 мм), марка проволоки - СВ-08ХГ2СМФ, флюс – АН 348А. Предварительный подогрев: $T_{подогрева}$- 160…180 °С, время подогрева – 45…50 мин, зона подогрева – поверхность катания и поверхность гребня со стороны поверхности катания, зона контроля температуры (термопара, пирометр) – внутренняя поверхность обода в зоне гребня. Указанные параметры не связаны, согласно инструкции, со степенью изношенности ЦКК в эксплуатации.

Для компьютерного моделирования разработан ряд конечно-элементных моделей, характеризующих возможное изменение геометрических размеров обода и гребня ЦКК в эксплуатации.

Согласно инструкции наплавка колеса выполняется, если толщина: обода изменяется в пределах от 70 до 30 мм, а гребня от 27 до 20 мм.

В связи с этим, были разработаны параметризованные конечно-элементные модели ЦКК, имеющие геометрические размеры в указанных выше пределах изменения толщины обода и гребня. Количество конечных элементов в моделях изменялось в зависимости от степени изношенности обода и гребня (от 2207 до 3509). На рис. 4 приведена конечно-элементная модель ЦКК, для $\delta_{обода}$ =70 мм, $\delta_{гребня}$ = 20 мм.

Рассмотрен процесс предварительного подогрева ЦКК, в значительной степени определяющей конечную структуру и свойства наплавленного колеса, перед наплавкой и проведено многовариантное моделирование этого процесса. В результате были сделаны следующие выводы:

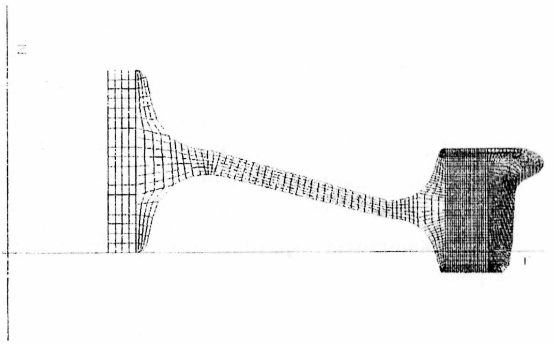


Рис. 4. Конечно-элементная модель колеса вагона, имеющего толщину: обода 70 мм, гребня 20 мм

1. Установлено, что для обеспечения подогрева зоны наплавки колеса с полномерным ободом до нормативного значения 180 °С за время равное 45 мин плотность теплового потока нагревательных устройств должна быть не менее $q = 10 \frac{Bm}{см^2}$.

2. Анализ результатов компьютерного моделирования процесса подогрева свидетельствует о том, что нормативное значение максимальной температуры подогрева (180 °С) при уменьшении толщины обода и неизменном нормативном времени нагрева (45 мин) не может быть выдержано. Для обода толщиной 30 мм (минимальная толщина обода, допускаемая к восстановлению наплавкой) фактическая температура в конце нагрева составляет 223 °С, т.е. на 43 °С превышает нормативную.
3. Установлена функциональная зависимость между толщиной обода изношенного ЦКК и временем его подогрева до нормативной температуры 180 °С. Это время изменяется от 33 мин для ЦКК с минимальной толщиной обода 30 мм до 52 мин для ЦКК с ободом 70 мм.
4. Установлено, что увеличение времени подогрева в пределах нормативного допуска с 45 мин до 50 мин приводит к повышению температуры от 267 °С для обода с толщиной 30 мм до 186 °С для обода 50 мм.
5. Установлено, что охлаждение зоны наплавки с максимальной температуры подогрева до минимально допустимого нормативного значения 160 °С для колес с толщиной обода от 30 до 70 мм происходит за время не менее 6 мин, что удовлетворяет нормативному интервалу времени от окончания подогрева до начала наплавки.
6. В случае увеличения температуры подогрева в зоне наплавки до 250 °С время нагрева должно находится в пределах 55 мин для толщины обода 30 мм и 94 мин для толщины 70 мм соответственно.

Проведено многовариантное моделирование структурообразования при наплавке. Полученные результаты изменения структурного состава в ОШЗ наплавленного слоя на различной глубине (3-5 мм) при наплавке первого и второго валиков и различных температурах предварительного подогрева для ЦКК со средней толщиной обода (50 мм) представлены в табл. 1.

Анализ результатов компьютерного моделирования, представленных в табл. 1, позволяет сформулировать следующие выводы: 1) отсутствие предварительного подогрева приводит к формированию условий образования в ОШЗ закалочных структур при наложении первого валика с последующим их распадом на феррито-цементитные смеси в результате повторного нагрева при наложении второго валика; 2) наиболее неблагоприятные структуры формируются после наплавки первого валика без предварительного подогрева, когда структура состоит из 60 % мартенсита и 40 % бейнита; 3) наибольшие структурные изменения при наплавке происходят в ОШЗ на глубине 3-4 мм от поверхности наплавки.

Аналогичные результаты получены для ЦКК с различной толщиной обода и гребня в указанных выше пределах. Установлено, что изменение толщины обода и гребня не оказывают заметного влияния на структурный состав в ОШЗ. Основное влияние оказывает температура предварительного подогрева.

Таблица 1.

Обобщенные данные о структурном составе в ОШЗ по результатам компьютерного моделирования наплавки гребня ЦКК ($\delta_{обода}$ =50 мм $\delta_{гребня}$ =20 мм) при различной температуре предварительного подогрева

Глубина от поверхности наплавки, мм	Вид структурной составляющей	Процентное содержание структурных составляющих, %					
		1 валик			2 валик		
		20 °С	180 °С	250 °С	20 °С	180 °С	250 °С
3 мм	Аустенит	0	61	60	0	0	0
	Бейнит	40	39	40	0	0	0
	Мартенсит	60	0	0	0	0	0
	Троостит	0	0	0	100	0	0
	Сорбит	0	0	0	0	100	100
4 мм	Аустенит	0	5	0	0	0	0
	Феррито-перлит	83	32	59	83	32	59
	Бейнит	17	63	41	17	0	0
	Сорбит	0	0	0	0	68	41
5 мм	Феррито-перлит	100	100	64	100	100	64
	Бейнит	0	0	36	0	0	0
	Сорбит	0	0	0	0	0	36

Основными результатами проведенного компьютерного моделирования тепловых процессов и структурных превращений при наплавке ЦКК является получение регрессионных зависимостей для оценки следующих технологических параметров:

1) Приращения температуры (ΔT) в контрольных точках при наплавке в зависимости от температуры предварительного подогрева и порядкового номера валика при постоянной толщине обода. Для обода с толщиной 30 мм эта зависимость для T_0=20…250 °С имеет вид:

$$\Delta T = \begin{cases} (0.000139 \cdot T_0 + 0.023725) \cdot N_t^4 - (0.00301 \cdot T_0 + 0.6595) \cdot N_t^3 + \\ + (0.022148 \cdot T_0 + 6.62145) \cdot N_t^2 - (0.050744 \cdot T_0 + 31.84113) \cdot N_t - \\ - (0.094444 \cdot T_0 - 85.888888) \text{ при } 20 \le T_0 \le 180 \\ - (0.000167 \cdot T_0 - 0.078786) \cdot N_t^4 + (0.0042914 \cdot T_0 - 1.973757) \cdot N_t^3 - \\ - (0.0392 \cdot T_0 - 17.66374) \cdot N_t^2 + (0.1611 \cdot T_0 - 69.973) \cdot N_t - \\ - (0.339686 \cdot T_0 - 130.0324) \text{ при } 180 < T_0 \le 250 \end{cases}$$

Аналогичные зависимости получены для ЦКК с толщиной обода 50 и 70 мм. Ни рис. 5 приведено графическое представление уравнения $\Delta T = f(N, T_0)$

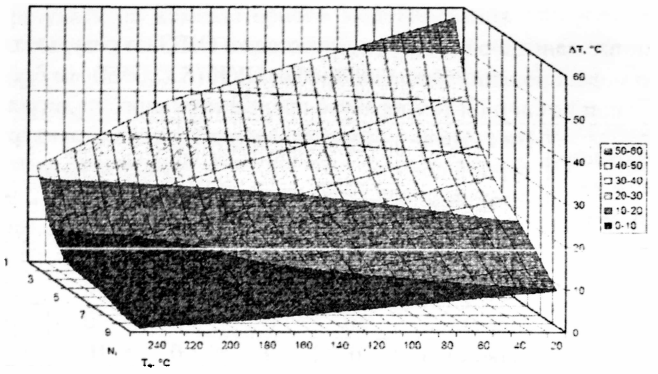


Рис. 5. Функциональная зависимость приращения температуры в контрольной зоне от номера накладываемого валика и температуры предварительного подогрева ($\delta_{обода}$=30 мм, $\delta_{гребня}$=20 мм)

2) Приращения температуры (ΔТ) в контрольных точках при наплавке в зависимости от толщины обода и порядкового номера валика при постоянной температуре предварительного подогрева. Для температуры предварительного подогрева T_0=180 °С эта зависимость для $\delta_{обода}$=30…70 мм имеет вид:

$$\Delta T = \begin{cases} -(0.001331 \cdot T_0 - 0.088625) \cdot N_i^4 + (0.029925 \cdot T_0 - 2.09905) \cdot N_i^3 - \\ -(0.241075 \cdot T_0 - 17.84025) \cdot N_i^2 + (0.8443 \cdot T_0 - 66.304) \cdot N_i - \\ -(1.18335 \cdot T_0 - 104.3895) \text{ при } 30 \le \delta \le 50 \\ \\ (-0.000405 \cdot T_0 + 0.04235) \cdot N_i^4 + (0.01176 \cdot T_0 - 1.1908) \cdot N_i^3 - \\ -(0.11711 \cdot T_0 - 11.642) \cdot N_i^2 + (0.4874 \cdot T_0 - 48.459) \cdot N_i - \\ -(0.7722 \cdot T_0 - 83.832) \text{ при } 50 < \delta \le 70 \end{cases}$$

Аналогичные зависимости получены для ЦКК при предварительном подогреве до температур 20 и 250 °С. На рис. 6 приведено графическое представление уравнения $\Delta T = f(N, \delta)$

3) Регрессионная зависимость глубины проплавления ($h_{пр}$) от температуры предварительного подогрева имеет вид:

$$h_{пр} = 3 \cdot 10^{-7} \cdot T_0^2 + 0.0017 \cdot T_0 + 2.3458$$

Следует отметить, что функция $h_{пр} = \varphi(T_0)$ близка к линейной.

4) В результате многовариантных расчетов установлена регрессионная зависимость процентного содержания мартенситной составляющей (М) в ОШЗ на глубине 3 мм от поверхности наплавки под первым валиком в зависимости от температуры предварительного подогрева, которая имеет вид:

$$M = -0.0026 \cdot T_0^2 + 0.0785 \cdot T_0 + 58.416$$

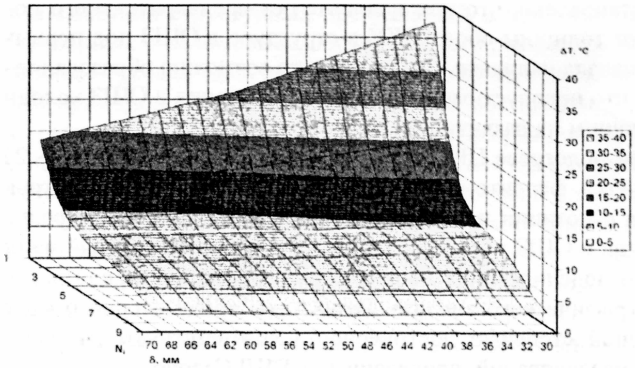


Рис. 6. Функциональная зависимость приращения температуры в контрольной зоне от номера накладываемого валика и толщины обода (T_0=180 °С, $\delta_{гребня}$=20 мм)

В табл. 2 представлены обобщенные данные по значениям приращений температур в контрольной зоне на момент окончания наплавки $1^{го}$ и $9^{го}$ валиков при различных температурах предварительного подогрева для рассмотренных вариантов толщин обода колеса. Анализ данных, приведенных в таблице, свидетельствует о том, что с увеличением температуры предварительного подогрева приращение температуры в контрольной зоне после наплавки первого и последнего валиков существенно снижается, что, очевидно, связано с температурным подпором при повышении температуры колеса. С этим же связано и существенное уменьшение приращение температуры при наплавке последнего валика. Снижение приращения температуры при увеличении толщины обода связано с тем, что теплота отводится не только в окружающую среду, но и в менее нагретые участки обода.

Таблица 2.

Приращение температуры (ΔT, °С)

$\delta_{обода}$	30 мм			50 мм			70мм		
T_0, °С	20	180	250	20	180	250	20	180	250
Наплавка $1^{го}$ валик	57	37	22	43	26	18	36	18	14
Наплавка $9^{го}$ валик	10	3	1	11	3	0	11	4	0

Установлено, что независимо от толщины обода ЦКК, содержание мартенситной составляющей в структуре в ОШЗ на глубине 3 мм от поверхности наплавки, соответствует приведенной выше регрессионной зависимости. Процентное содержание мартенситной составляющей в случае подогрева перед наплавкой выше 165 °С снижается до нуля.

Установлено, что при наплавке без предварительного подогрева независимо от толщины обода ЦКК в структуре в ОШЗ под первым валиком на момент начала наплавки второго валика возможно образование до 60 % мартенсита, что недопустимо с позиции образования в ОШЗ холодных трещин с последующим их развитием и разрушением колеса.

При подогреве ЦКК перед наплавкой в пределах 180 – 250 °С в ОШЗ формируется феррито-перлитая или феррито-сорбитная структура, благоприятная с позиции исключения образования холодных трещин. Структурный состав в ОШЗ по окончании наплавки, определяемый на основе компьютерного моделирования по разработанной методике, соответствует данным металлографического анализа. Результаты компьютерного моделирования с достаточной степенью достоверности соответствуют данным экспериментальных исследований, проведенных в ВЧД Сасово.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1) На основании анализа состояния вопроса и нормативных материалов по однодуговой наплавке ЦКК определена необходимость уточнения и обоснования ряда параметров технологического процесса с учетом различной степени изношенности обода и гребня колеса:
   - температуры подогрева и распределение температур в колесе перед началом наплавки;
   - интервала времени от окончания подогрева до начала наплавки по критерию обеспечения определенной температуры начала наплавки;
   - влияния изменения толщины обода на температуру подогрева колеса перед наплавкой и ее изменение при многопроходной наплавке;
   - кинетики изменения структурного состава в ОШЗ при многопроходной наплавке гребня ЦКК с различной степенью изношенности обода, наличие смеси структур и их зависимости от температуры в каждом КЭ.
2) Разработанные методика и программное обеспечение для анализа кинетики тепловых процессов в нестационарной нелинейной постановке при наплавке ЦКК основаны на использовании современных численных методов и средств программирования. В отличие от ранее выполненных работ в излагаемой диссертации для анализа кинетики структурных превращений разработана методика, основанная на использовании серии диаграмм анизотермического распада аустенита при охлаждении с различных максимальных температур, характерных для всего спектра температур в ОШЗ от подсолидусных до A_{c1}. Обоснована необходимость анализа на основе использования диаграмм АРА в координатах $T\text{-}w_{8/7}$. Предложена методика перестроения диаграмм из координат $T\text{-}w_{6/5}$ в $T\text{-}w_{8/7}$.

3) Для анализа кинетики структурных превращений в процессе повторных нагревов, связанных с наложением последующих валиков при многопроходной наплавке гребней ЦКК разработана методика, основанная на использовании принципа приращения структурных составляющих на текущем шаге решения с учетом температурных интервалов структурных превращений и структурного состава на предыдущем шаге решения.
4) Разработанное программное обеспечение соответствует поставленным в диссертации целям и задачам. Эффективность разработанного методического и программного обеспечения подтверждена результатами проведенной верификации. Разработаны конечно-элементные модели ЦКК, соответствующие различной степени изношенности ЦКК в эксплуатации.
5) На основе моделирования установлено, что для обеспечения подогрева зоны наплавки колеса с полномерным ободом до нормативного значения 180 °С за время, равное 45 мин, плотность теплового потока нагревательных устройств должна быть не менее 10 $^{Вт}/_{см^2}$. Установлено, что в случае непрерывного ведения процесса наплавки гребня дополнительный подогрев не требуется ввиду того, что при этом имеет место приращение температур от всех проходов для всех рассмотренных технологических вариантов наплавки.
6) Установлено, что глубина проплавления остается практически независимой при изменении толщины обода от 30 до 70 мм и является практически линейной функцией от температуры предварительного подогрева при неизменных параметрах режима наплавки. Установлено, что структурообразование в ОШЗ практически не зависит от толщины обода и гребня, а в основном определяется температурой предварительного подогрева и ее изменением в процессе наплавки.
7) Предложено считать одним из критериев качества процесса наплавки гребней отсутствие мартенситной составляющей в структуре ОШЗ на всех этапах процесса. Установлено, что вероятность образования мартенситной структурной составляющей уменьшается до нуля при подогреве перед наплавкой до температур выше $T_{\min} = 165°C$. Температура подогрева должна быть не ниже чем $T_{\min}^{под} = T_{\min} + (20 + 50°C)$. Установлено, что при наплавке без предварительного подогрева независимо от толщины обода ЦКК в структуре в ОШЗ под первым валиком на момент начала наплавки второго валика возможно образование до 60 % мартенсита, что недопустимо с позиции возможности образования трещин в ОШЗ с последующим их развитием в эксплуатации. При подогреве ЦКК перед наплавкой в пределах 180 – 250 °С, в ОШЗ формируется феррито-перлитная или феррито-сорбитная структура, что соответствует данным металлографического анализа. Такая структура благоприятна с позиции повышения эксплуатационных характеристик колеса, восстановленного наплавкой.

8) На основе обобщения результатов компьютерного моделирования тепловых процессов и структурных превращений при восстановлении наплавкой гребней ЦКК получен ряд регрессионных зависимостей, удобных для использования в инженерной практике для определения: времени подогрева до заданной температуры от $\delta_{обода}$; кинетики приращения температуры в зависимости от $\delta_{обода}$, температуры предварительного подогрева и порядкового номера прохода; возможного процентного содержания мартенсита в зависимости от температуры предварительного подогрева.
9) На основе проведенных исследований даны конкретные рекомендации по возможному уточнению ряда параметров технологического процесса, указанных в п. 1 выводов, направленных на повышение эксплуатационных характеристик наплавленных колес.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1. Оценка взаимодействия колеса с рельсом с учетом остаточных напряжений / С.Н. Киселев, А.С. Киселев, А.В. Саврухин, А.Н. Неклюдов // Тяжелое машиностроение. – 2002. - №12. – С. 20 – 21.
2. Саврухин А.В. , Неклюдов А.Н. Тепловые процессы при восстановлении наплавкой фрикционной планки тележки грузового вагона // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2002. - №7. – С. 16 – 20.
3. Контроль параметров термической обработки колес вагонов на основе компьютерного моделирования / С.Н. Киселев, А.С. Киселев, И.А. Мартьянова, А.Н. Неклюдов // Контроль. Диагностика. – 2002. - №12. – С. 19 – 23.
4. Компьютерная диагностика тепловых режимов в колесах вагонов при различных режимах торможения / С.Н. Киселев, А.С.Киселев, А.В.Саврухин, А.Н. Неклюдов // Контроль. Диагностика. – 2004. - №6. – С. 22 - 26.
5.Расчетно-экспериментальный метод определения остаточных напряжений с учетом распределения по глубине металла / С.Н. Киселев, А.С. Киселев, А.В. Саврухин, А.Н. Неклюдов // Технология, оборудование и подготовка кадров в сварочном производстве: Тезисы докладов ВТНК. – М., 2003. – С. 270 – 275.
6. Киселев С.Н., Саврухин А.В., Неклюдов А.Н. Оценка кинетики структурных превращений в колесах вагонов при восстановлении наплавкой // Сварка и контроль: Тезисы докладов Всероссийской с международным участием научно-технической конференции. – Пермь, 2004. – С. 131 – 132.

Подписано в печать 15.11.04г. Объем 1,0 п.л. Тираж 100экз.

Заказ 252 Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана.