На правах рукописи




Мартьянова Ирина Александровна

# СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ И НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ЦЕЛЬНОКАТАНЫХ КОЛЕС НА ОСНОВЕ СОЧЕТАНИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МЕТОДОВ И КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Специальность 05.02.11 - Методы контроля и диагностика в машиностроении

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

И. Мар

Москва - 2003

Работа выполнена в Московском государственном университете путей сообщения (МИИТ)

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

Официальные оппоненты:
доктор технических наук, профессор **Гладков Э.А.**

кандидат технических наук, доцент **Коржин С.Н.**

У1661304
Мартьянова И.А.
Совершенствование методов контроля тепловых процессов и напряженного состояния при изготовлени...
0-00
2003

«Тверской институт вагоностроения»

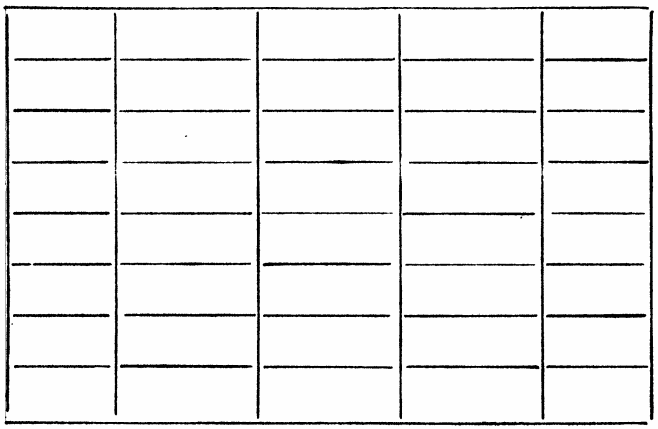
ся «15» января 2003 г. на заседании
1.01. при Московском государственном
Баумана по адресу:
t., д.5.

ном экземпляре, заверенный печатью,
:у.

ься в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Бау-

У1661304

ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ
обозначенного здесь срока






.В. Коновалов

102

## Общая характеристика работы

**Актуальность работы.** Колеса подвижного состава являются наиболее ответственными конструктивными элементами, работоспособность которых в эксплуатации во многом определяет безопасность перевозочного процесса.

При оценке работоспособности колес к основным факторам относятся структурное состояние металла и напряженно - деформированное состояние (НДС). В представленной работе рассмотрены вопросы, связанные с совершенствованием системы и методов контроля основных параметров процесса термообработки колеса на заводе - изготовителе. Анализ заводской технологии изготовления цельнокатаных колес вагонов (ЦКК) и методов сквозного и выходного контроля, свидетельствует о том, что целый ряд параметров технологического процесса термической обработки колес, определяющих их эксплуатационные свойства, не могут быть подвергнуты инструментальному контролю. В этом случае перспективными являются методы компьютерного моделирования процессов при термической обработке.

НДС и структурообразование следует рассматривать на различных этапах термической обработки, как при закалке, так и при отпуске. Следует отметить, что в последние годы вопросам контроля колес на различных этапах их изготовления и эксплуатации уделяется все большее внимание во всех промышленно развитых странах мира США, Германии, Японии и др.

В связи с вышеизложенным разработка, совершенствование методов и средств контроля ЦКК при их изготовлении на основе сочетания методов компьютерного моделирования и инструментального контроля является актуальной задачей.

**Цель работы.** Повышение качества и работоспособности цельнокатаных колес вагонов путем совершенствования методов контроля тепловых и деформационных процессов при их термической обработке на заводе - изготовителе на основе сочетания инструментальных методов и компьютерного моделирования.

**Методы исследований.** При проведении исследований использованы следующие методы: компьютерное моделирование тепловых, структурных и деформационных процессов в зависимости от условий термической обработки, контроль температур с использованием современных измерительных средств, металлографические исследования; экспериментальное определение остаточных напряжений неразрушающим магнитоупругим методом; определение остаточных напряжений методом тензометрии.

**Научная новизна.**

1. Разработана расчетно – экспериментальная методика контроля температур начала закалки и качества настройки спрейеров при закалке колеса, основанная на измерении температур в определенных точках на поверхности обода и использовании расчетных номограмм.





2. Разработана методика численного моделирования тепловых процессов при термической обработке цельнокатаных колес.

3. Установлено, что в момент поступления в отпускную печь после закалки температура в ободе колеса в зависимости от времени охлаждения при закалке колеблется в пределах 320 ÷ 450 $^0$C, что удовлетворяет нормативным документам.

4. Установлено, что температура в точках на боковых поверхностях обода зависит от схемы охлаждения при закалке, а температура в зоне сопряжения гребня с поверхностью катания не зависит от схемы охлаждения, но определяется температурой начала закалки, что может быть использовано для реализации контроля параметров термической обработки колеса.

5. Установлено, что зона инициализации хрупкого разрушения колес в эксплуатации совпадает с зоной максимальных растягивающих напряжений в ободе колеса, возникающих в момент окончания закалки. Схема и уровень остаточных напряжений в момент окончания закалки определяется схемой настройки спрейеров.

**Практическая ценность.**

1. Разработана инструкция для заводского контроля температур на определенных этапах термической обработки ЦКК на основе инструментального контроля и номограмм, полученных на основе компьютерного моделирования;

2. Разработано программное обеспечение для численного моделирования кинетики температурных полей в ЦКК при термообработке;

3. На основании результатов проведенных исследований сформулированы предложения по совершенствованию системы сквозного контроля качества изготовления колес вагонов. Предложено ввести операцию контроля контактной термопарой температуры, в определенных зонах обода колеса, в момент его поступления из закалочной машины на рольганг для транспортировки к отпускной печи.

4. Разработана методика определения остаточных напряжений в ЦКК неразрушающим магнитоупругим методом и проведена ее апробация в условиях производства на ОАО «Выксунский металлургический завод» (акт внедрения).

**Апробация работы.**

Основные результаты были доложены на: научно-практической конференции "Неделя науки – 99", 1999г., МИИТ; конференции "Сварка и родственные технологии – в XXI век", 1998г. Киев; 2-ой Всероссийской научно-технической конференции, 1998г., Тула; научно-практической конференции «Безопасность движения поездов», 2002, МИИТ; конференции "Восстановление и упрочнение деталей – современный эффективный способ повышения надежности машин", 1997г., Москва; на научных семинарах кафедры «ТСМИ» МИИТ.

Основные результаты и положения диссертации опубликованы в 8 печатных работах. Работа выполнена в соответствии с планом НИР и ОКР МПС РФ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, трех глав, общих выводов по работе и приложения, изложена на 145 страницах машинописного текста, содержит 52 рисунка, 15 таблиц, 64 наименования использованных литературных источников.

## Основное содержание работы

**Глава 1.** В первой главе проводится анализ условий эксплуатации и повреждаемости цельнокатаных колес вагонов. Отмечается, что в последние годы значительно возрос износ ЦКК в эксплуатации. Основными причинами увеличения интенсивности износа является сужение колеи, применение профиля поверхности катания колес с уменьшенной конусностью, существенное превышение твердости рельса над твердостью колеса и ряд других факторов. Одной из наиболее часто встречающихся причин преждевременного выхода из строя колес вагонов является местный в виде подреза или общий износ толщины гребней до уровня ниже допустимого, равного 23 мм.

В эксплуатации наблюдаются хрупкие и усталостные разрушения колёс грузовых вагонов. Проведённый анализ показал, что причиной хрупких разрушений в ряде случаев являлся высокий уровень остаточных технологических напряжений в ободе колеса.

С момента создания ЦКК целым рядом научных организаций проводятся исследования по оценке влияния параметров термической обработки при изготовлении на структуру и механические свойства. Наиболее значительные результаты исследований в области анализа кинетики тепловых процессов и структурообразования получены такими учеными как, Ларин Т.В., Узлов В.И., Школьник Л.М., Филиппов Г.А., Макаров Э.Л., Киселев С.Н., Киселев А.С., Кравченко В.А., Пашолок И.Л., Сухов А.В., Саврухин А.В., Кузьмина Г.Д., Schneider E. (Германия), Kuhlman C. (США) и др.

В диссертации проведен подробный анализ отечественных и зарубежных нормативных требований к уровню качества (механические свойства, структура и др.) и методам определения остаточных напряжений в колесах. Установлено, что необходимо дальнейшее развитие методов и средств для контроля тепловых и структурных процессов при термической обработке колес, а также методов неразрушающего контроля остаточных напряжений во всем объеме колес.

Проведенный анализ показывает, что цельнокатаные колеса испытывают в эксплуатации сложное нагружение, что приводит к возникновению различного рода повреждений. Высокий уровень требований к безотказности ЦКК в эксплуатации требует повышения стабильности их качества при изготовле-

нии, что может быть достигнуто повышением уровня контроля и совершенствованием методов его проведения. Особенно большое влияние на формирование конечных свойств колеса оказывает заключительная термическая обработка в виде объемной закалки обода колеса и последующего отпуска. К основным параметрам термической обработки относятся: максимальная температура нагрева под закалку; схема настройки спрейеров охлаждающего устройства относительно обода колеса; время охлаждения при закалке; температура отпуска; время отпуска.

В настоящее время применяются две технологии термической обработки ЦКК: технология Выксунского металлургического завода (ВМЗ) и Нижне – Тагильского металлургического комбината (НТКМ). По технологии ВМЗ предусмотрена вертикальная закалка обода колеса четырьмя спрейерами, охлаждающими поверхность катания и боковые поверхности обода. По технологии НТМК производится горизонтальная закалка колеса. Большинство колес для вагонов изготавливается ВМЗ. В излагаемой диссертации рассмотрена кинетика тепловых процессов, а также структурообразование при закалке и последующем отпуске ЦКК по технологии этого завода.

Анализ заводской технологии показал, что ряд важных технологических параметров, определяющих возможность получения заданных свойств в установленных пределах, не могут быть подвергнуты контролю инструментальными средствами. Эта проблема в некоторых случаях может быть решена на основе проведения компьютерного моделирования процессов теплопереноса, структурообразования, формирования полей деформаций и напряжений. Для обеспечения высокого качества ЦКК необходимо совершенствование методов контроля этих процессов при термической обработке на основе сочетания инструментальных методов контроля и результатов компьютерного моделирования.

На основании проведенного анализа сформулированы цель и задачи исследования.

**Глава 2** посвящена разработке методики и алгоритма компьютерного моделирования тепловых и деформационных процессов, а также структурных превращений в ЦКК на основе использования фундаментальных положений теплопереноса и теплообмена, а также метода конечных элементов (МКЭ). Колесо вагона имеет достаточно сложную геометрию, поэтому анализ процессов распространения теплоты при термической обработке колеса проводится при достаточно точном моделировании, как геометрии рассматриваемой детали, так и физической модели тела. Наибольшее соответствие результатов расчетов и реальных процессов при этом достигается в случае решения нелинейной, нестационарной задачи теплопроводности. Это предполагает пошаговое рассмотрение процессов нагрева и охлаждения, а также решение задачи теплопроводности с учетом зависимости теплофизических характеристик материала колеса от температуры.

При разработке алгоритма решения задачи теплопроводности использовано уравнение теплопроводности в сплошной среде:

$$K_{xx} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + K_{yy} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + K_{zz} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + Q = 0 \quad (1)$$

где $T$ - температура; $K_{xx}, K_{yy}, K_{zz}$ - коэффициенты теплопроводности в направлениях осей x, y, z; Q - мощность источника теплоты внутри тела.

При решении нестационарной задачи теплопроводности уравнение имеет вид:

$$[C] \cdot \frac{\partial\{T\}}{\partial \tau} + [K] \cdot \{T\} + \{F\} = 0 \quad (2)$$

где [C] – матрица теплоемкости, [K] – матрица теплопроводности, {T} – вектор температур, {F} – вектор тепловых нагрузок.

Колесо вагона является телом вращения. При охлаждении в процессе закалки колесо вращается со скоростью 90 - 110 об/мин поэтому допустимо рассмотрение кинетики тепловых процессов в осесимметричной постановке. Дифференциальное уравнение теплопроводности для осесимметричного тела имеет вид:

$$K_{rr} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{K_{rr}}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + K_{zz} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q = 0 \quad (3)$$

где r - радиальная координата точки, z - осевая координата точки.

При разработке методики получены матрицы теплопроводности и теплоёмкости осесимметричных конечных элементов, которые соответствуют приведенным в ряде фундаментальных работ Сегерлинда, Зенкевича.

Для проведения моделирования была разработана конечноэлементная модель, состоящая из 816 элементов, 473 узлов. При разработке модели использована неравномерная степень дискретизации ЦКК на конечные элементы. В ступице колеса использованы элементы больших размеров, а в ободе, где отмечаются наибольшие градиенты температур, применены конечные элементы с размером стороны 2,5 мм. На рис. 1 представлена конечноэлементная модель ЦКК.

Разработанное программное обеспечение позволяет быстро и эффективно оценивать влияние целого ряда факторов процесса термической обработки на получаемые свойства колеса и на этой базе совершенствовать систему сквозного контроля температур и качества настройки спрейеров при термической обработке. Это позволяет в заводских условиях оперативно производить корректировку параметров технологического процесса.

На основе анализа параметров технологического процесса термической обработки ЦКК определены граничные и начальные условия для компьютер-

ного моделирования кинетики тепловых процессов и структурных превращений с учетом возможных изменений схемы спрейерного охлаждения.

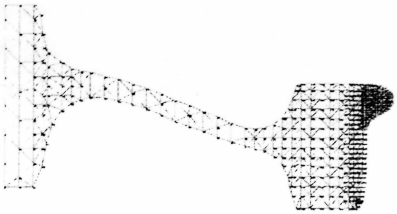
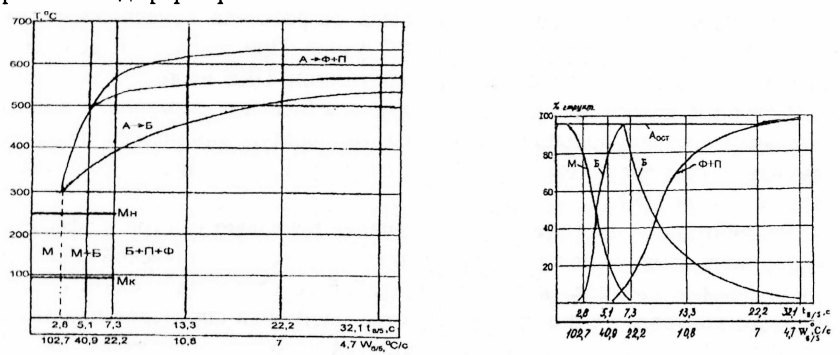


Рис. 1. Осесимметричная конечноэлементная модель цельнокатаного колеса

Компьютерное моделирование процессов закалки и отпуска проводилось с учетом фазовых и структурных превращений, диаграммы анизотермического распада аустенита колесной стали марки 2. На рис. 2 а и б приведена диаграмма анизотермического распада аустенита и структурная диаграмма для колесной стали марки 2, для случая охлаждения с $T_{max}$=850 $^0$C, полученные на основе дилатометрических испытаний, проведенных кафедрой ТСМИ МИИТа совместно с кафедрой «Технология сварки и диагностика» МГТУ им. Баумана.

В результате анализа диаграммы установлены диапазоны скоростей охлаждения, соответствующие различным видам и степени фазовых и структурных превращений. Результаты этого анализа представлены в табл. 1. Полученные результаты имеют существенное значение для анализа структурных превращений при закалке и отпуске, а также для анализа кинетики напряженно - деформированного состояния колеса.




а) б)

Рис. 2. Диаграмма анизотермического распада аустенита а) и структурная диаграмма б) колесной стали марки 2 ($T_{max}$=850 $^0$C)

Таблица 1.

Структурный состав колесной стали марки 2 в зависимости от $W_{6/5}$

| $W_{6/5}$, $^0$C/c, | 102,7 | 40,9 | 22,2 | 10,7 | 7,0 |
|---|---|---|---|---|---|
| М, % | 90,0 | 28,0 | 4,5 | - | - |
| $Б_l$, % | 5,0 | 67,0 | 80,0 | 22,0 | 5,0 |
| Ф + П, % | - | - | 10,5 | 73,0 | 90,0 |
| $A_{ост}$, % | 5,0 | 5,0 | 5,0 | 5,0 | 5,0 |

Верификация, разработанных в диссертации методики и программного обеспечения, проведена на основе сопоставления результатов расчетов с данными экспериментальных измерений, полученными на ВМЗ, а также с результатами расчетов по программному комплексу «Сварка» (МГТУ им. Баумана и РНЦ Курчатовский институт).

Рассмотрена закалка цельнокатаного колеса по штатной схеме (рис. 3 а) в диапазоне максимальных температур от 800 $^0$C до 900 $^0$C при охлаждении спрейерами в течение 160 с и последующим охлаждением на воздухе в диапазоне 40 с, необходимых для проведения измерений температуры в контрольных точках обода колеса. С целью совершенствования системы контроля качества закалки ЦКК на ВМЗ в работе обоснована целесообразность введения за закалочной машиной поста контроля температур контактной термопарой (см. рис. в диссертации), для оперативного анализа и выявления отклонения от нормативного значения $T_{max}$ закалки и возможных отклонений в схеме настройки спрейеров.

Данные заводского контроля, для указанного выше варианта закалки (840 $^0$C, 160 с) при штатной схеме охлаждения (рис. 3 а) в зоне перехода гребня к поверхности катания (элемент № 321, рис. 3 б), получены путем прямого измерения температуры с помощью контактной термопары через 12 - 16 с после окончания закалки колеса. Сравнение экспериментальных данных соответствующих средним значениям (не менее пяти измерений) с результатами расчета представлено в табл. 2.

Из анализа таблицы следует, что экспериментальные данные в большей степени соответствуют расчетным данным при закалке с температуры близкой к 900 $^0$C, по штатной схеме охлаждения (рис. 3 а). Это означает, что фактическая температура колеса в момент начала закалки может существенно отличаться от нормативной (T=840 $^0$C) из-за недостаточной точности заводского контроля, осуществляемого оптическими пирометрами. Допустимые отклонения по температуре приведены ниже.

Рассмотрены различные схемы охлаждения зоны обода колеса при закалке: штатная (рис. 3 а) и возможные варианты отклонений от штатной технологии в производственных условиях, которые определяются положением и направлением потока воды спрейеров: вариант I (рис. 3 б), вариант II (рис. 3 в) и вариант III (рис. 3 г).

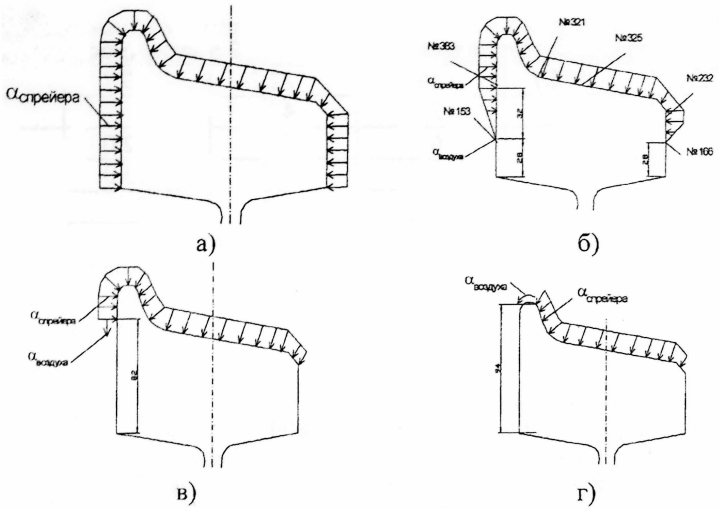



Рис. 3. Схемы закалки

Таблица 2.

Экспериментальные и расчетные значения температур после закалки в зоне перехода гребня к поверхности катания (точка № 321 рис. 3 б)

| Время с момента окончания закалки, с | Эксперимент 840 $^0$C, 160 с | Расчетные температуры в зависимости от $T_{max}$ начала закалки, $^0$C, при закалке по схеме (рис. 3 а) | | | | | | Расчетные температуры при закалке по схемам (рис. 3 б, 4 в, 3 г) $T_{зак}$ = 840 $^0$C, 160 с | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 800 | 830 | 840 | 850 | 880 | 900 | вар. I (рис. 3 б) | вар. II (рис. 3 в) | вар. III (рис. 3 г) |
| 12 | 230 | 201 | 209 | 211 | 214 | 223 | 229 | 211 | 212 | 213 |
| 15 | 250 | 214 | 222 | 225 | 228 | 238 | 244 | 225 | 226 | 228 |
| 16 | 260 | 218 | 226 | 229 | 232 | 242 | 249 | 229 | 230 | 232 |

Для учета возможных отклонений в расположении спрейеров от штатной схемы закалки выбрана схема расположения контрольных точек, с номерами соответствующими номерам узлов конечно - элементной модели, приведенная на рис. 3 б. В табл. 3 приведены температуры в этих точках для случая закалки с $T_{max}$ =840 $^0$C и времени охлаждения при закалке 160 с для различных схем охлаждения.

Таблица 3

| Узлы (рис. 3б) | Температура, $^0$C | | | |
|---|---|---|---|---|
| | штатный режим закалки (рис. 3 а) | вариант I (рис. 3 б) | вариант II (рис. 3 в) | вариант III (рис. 3 г) |
| 153 | 50 | 152 | 812 | 812 |
| 166 | 55 | 163 | 806 | 806 |
| 232 | 28 | 28 | 101 | 310 |
| 383 | 26 | 26 | 115 | 530 |
| 325 | 57 | 57 | 57 | 57 |

Из таблицы видно, что контроль за схемой расположения спрейеров при закалке может производиться путем измерения температур в точках № 153, № 166, № 383, № 232 на боковых поверхностях обода, т.к. расчетная температура в этих точках обода в зависимости от реализованной схемы охлаждения изменяется в достаточно широких пределах от 50 $^0$C до 812 $^0$C. В то же время температура в точке сопряжения гребня с поверхностью катания № 321 не зависит от схемы охлаждения и контроль температуры колеса перед закалкой может быть осуществлен в данной точке.

Следует отметить, что контроль указанных параметров технологического процесса является принципиально важным, т.к. результаты исследований, приведенных ниже в главе 3, свидетельствуют о влиянии этих параметров на НДС и структурные составляющие колес после полного изготовления.

**Глава 3.** В этой главе рассмотрены результаты компьютерного моделирования и экспериментального определения температурных полей, структурных превращений и НДС в ЦКК при термической обработке, полученные на основе разработанного методического и программного обеспечения, изложенного во второй главе. Проведен сравнительный анализ термообработки ЦКК при различных режимах закалки. Время охлаждения при закалке в зависимости от колебаний химического состава согласно ГОСТ 10791 - 89 может изменяться в пределах от 240 до 120 с. Данные о распределении температур в точке № 321 при закалке по штатной схеме (рис. 3 а) в момент контроля температуры контактной термопарой (через 11 – 17 с после снятия колеса с закалочной машины) с учетом времени охлаждения при закалке, обобщены в табл. 4.

На рис. 4 представлены расчетные и экспериментальные данные об изменении температур в точке № 321 в зависимости от времени охлаждения при закалке и последующего охлаждения колеса на воздухе (11 – 17 с) после поступления на рольганг, транспортирующий колесо в отпускную печь.

Анализируя полученные данные можно сделать вывод о том, что температура в точке № 321 в момент измерения может служить не только параметром контроля температуры начала закалки, но и времени охлаждения колеса

при закалке, т.к. при изменении времени закалки от 120 с до 240 с температура в зоне измерения уменьшается от 280 $^0$C до 160 $^0$C.

Таблица 4.

Температура в точке № 321 в зависимости от времени охлаждения при закалке с $T_{max}$=840 $^0$C и последующего охлаждения на воздухе 11 – 17 с

| Источник информации | Время охлаждения при закалке, с | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 120 | 160 | 200 | 240 |
| | Время после закалки, с / температура в точке № 321, $^0$C | | | |
| расчет | 17 / +286 | 17 / +225 | 16 / +216 | 14 / +159 |
| | 16 / +280 | 12 / +220 | 11 / +162 | |
| инструментальный контроль | | 12 / +240 | | |
| | | 15 / +250 | | |

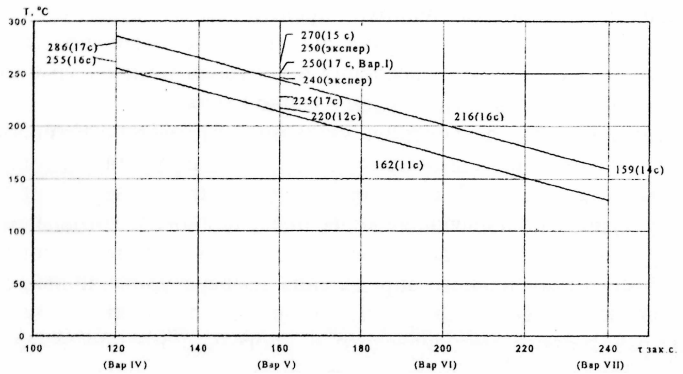



Рис. 4. Изменение температуры в точке сопряжения радиуса гребня с поверхностью катания в зависимости от времени закалки

Проведен анализ термических циклов и скоростей охлаждения в различных точках на поверхности обода колеса, который позволил обосновать закономерности структурообразования при термообработке ЦКК.

С момента окончания закалки активно развивается процесс самоотпуска - нагрев охлажденных поверхностей обода теплотой неохлажденной части колеса. Этап самоотпуска приводит к существенному изменению распределения температур и структурного состояния колеса еще до начала отпуска. Установлено, что температура у поверхности катания по окончании процесса закалки (120 с), начинает повышаться и температура во всех точках обода на глубине до 30 мм выравнивается на уровне 420 – 450 $^0$C через 700 с.

Аналогичные исследования проведены для других времен охлаждения при закалке (до 240 с). Установлено, что к моменту поступления колеса в отпускную печь температура может изменяться в пределах от 320 $^0$C до 450 $^0$C, что соответствует нормативным требованиям по температуре поступления

колеса после закалки в отпускную печь. Соответственно кинетике тепловых процессов протекают структурные превращения.

На основе моделирования установлено, что в момент окончания закалки на глубине 1,5 мм образуется ~ 78 % аустенита ($А_{ост}$) и 22 % мартенсита (М). При самоотпуске вначале происходит частичное превращение $А_{ост} \rightarrow$ бейнит (Б), а также активно идет процесс распада М $\rightarrow$ троостит (Т) и превращение $А_{ост} \rightarrow$ Т и Б $\rightarrow$ Т, и к 700-й секунде структура состоит из Т и С.

Проведенный анализ заводской технологии показал, что на качество колес в значительной мере влияет температура начала закалки и схема настройки спрейеров. Температура начала закалки зависит от целого ряда случайных факторов и не может быть определена путем измерений. Фактическое расположение спрейеров также зависит от ряда случайных факторов и в пределах одной смены может изменяться, что также не может быть зафиксировано средствами, предусмотренными в заводской технологии. Поэтому в диссертации предложена расчетно-экспериментальная методика контроля качества термообработки колес, основанная на использовании результатов компьютерного моделирования, тепловых процессов и экспериментальной оценки распределения температур после завершения закалки.

Последовательность операций при использовании предлагаемой расчетно - экспериментальной методики заключается в следующем

В момент выключения спрейеров включается секундомер и через 8 - 10 с колесо поступает на пост контроля температуры. Контактная термопара устанавливается в зоне сопряжения гребня с поверхностью катания (точка № 321 рис. 3 б). В момент окончания измерений фиксируется время измерения равное сумме времени закалки и времени измерения. Далее на той же позиции производится контроль качества настройки спрейеров. Для этого сразу по окончании измерения в точке № 321 измеряется температура на нижней боковой поверхности обода и фиксируется время измерения также с момента окончания охлаждения при закалке. Практика показала, что общее время двух измерений температуры не превышает 20 секунд.

Затем на номограмме (рис. 5) на оси абсцисс откладывается время от начала закалки, а на оси ординат температура первого измерения. Точка пересечения координат попадает на одну из расчетных кривых на номограмме (рис. 5), соответствующих определенной температуре начала закалки колеса. Если температура меньше нормативной более чем на 20 $^0$С и больше более чем на 40 $^0$С, то колесо следует подвергнуть повторной закалке.

Затем по номограмме (рис. 6) аналогичным образом определяется схема настройки спрейеров. Попадание точки ниже линии АВ говорит о том, что спрейеры настроены по штатной схеме. Попадание точки выше линии СД свидетельствует о том, процесс закалки необходимо приостановить для перенастройки спрейеров, т.к. реализуется самый неблагоприятный с позиции формирования напряжений вариант закалки ЦКК. При попадании точки в

область АВСД по номограммам определяется величина смещения спрейеров от штатной схемы в зависимости от попадания точки на ту или иную расчетную кривую.

Предложенная методика позволяет проводить 100 % контроль температуры начала закалки и выявить случаи закалки колес с пониженной температурой и соответствующими отклонениями от нормативных требований в уровне свойств и структуры. Таким образом, обеспечивается дополнительный 100 % контроль тепловых процессов при термообработке колес.

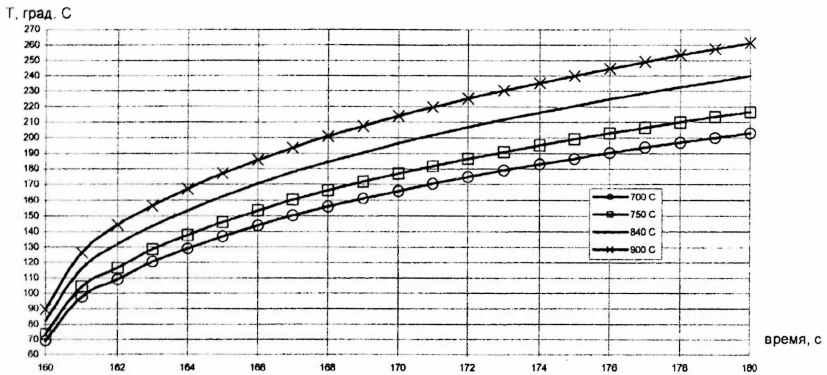



Рис. 5. Номограмма для определения температуры начала закалки

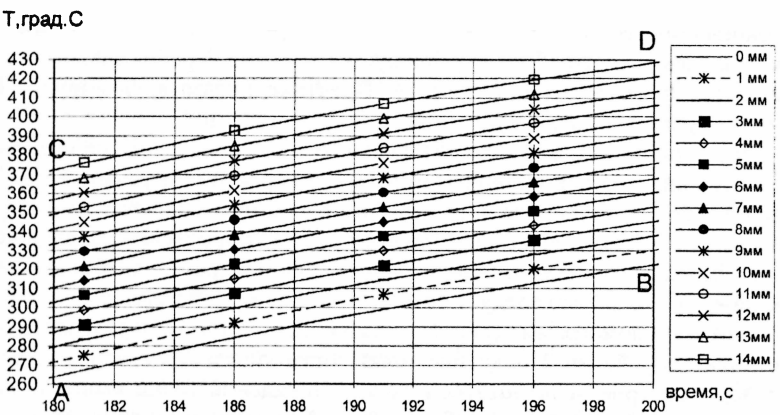



Рис. 6. Номограмма оценки качества настройки спрейеров через 20с после окончания закалки.

Существенный интерес для оценки состояния колеса в процессе термообработки представляют величины временных и остаточных деформаций и напряжений. Путем моделирования на основе использования программного комплекса «Сварка» определены все компоненты деформации и напряжений для различных вариантов охлаждения при закалке*. Установлено, что схема охлаждения колеса при закалке оказывает существенное влияние на формирование НДС в ободе колеса особенно в момент окончания закалки.

Для всех трех вариантов отклонения от штатного режима охлаждения при закалке (рис. 3 б – 3 г) результаты расчета напряженно - деформированного состояния для времени охлаждения при закалке 160 с, обобщены в табл. 5.

Таблица 5

| Вариант | Напряжения, МПа | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | В момент окончания закалки 160 с, $T_{max}$ =840 $^0$C | | | | | |
| | $\sigma_{r\ зак}$ | | $\sigma_{o\ зак}$ | | $\sigma_{\theta\ зак}$ | |
| | max | min | max | min | max | min |
| рис. 3 б | +663 | -1070 | +300 | -1080 | +843 | -991 |
| рис. 3 в | +541 | -946 | +315 | -1070 | +978 | -842 |
| рис. 3 г | +255 | -703 | +326 | -1070 | +655 | -860 |

Отрицательные значения напряжений в табл. 5 соответствуют поверхности обода, растягивающие напряжения – в центре обода.

В табл. 6 обобщены результаты расчета напряженно - деформированного состояния для всех трех вариантов отклонения от штатного режима охлаждения при закалке (рис. 3 б – 3 г) для закалки и последующего отпуска при 500 $^0$C 3 часа. Видно, что наиболее неблагоприятная схема с высокой концентрацией растягивающих напряжений, с компонентами близкими к пределам текучести, сформировавшихся структурных составляющих, соответствует второму варианту охлаждения. Таким образом, определение на этапе закалки реализованной схемы охлаждения колеса обеспечивает предварительный анализ НДС после завершения термообработки.

Таблица 6

| Вариант | Напряжения после отпуска 500 $^0$C 3 часа, закалка 160 с, МПа | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $\sigma_{r\ отп}$ | | $\sigma_{o\ отп}$ | | $\sigma_{\theta\ отп}$ | |
| | max | min | max | min | max | min |
| рис. 3 б | +263 | -230 | +113 | -315 | +178 | -380 |
| рис. 3 в | +158 | -167 | +68 | -258 | +139 | -341 |
| рис. 3 г | +128 | -168 | +56 | -183 | +137 | -227 |
| штатный $\tau_{зак}$=160с | +338 | -240 | +103 | -339 | +220 | -420 |

* Моделирование по программному комплексу «Сварка» выполнено под рук. д.т.н. Киселева А.С.

Полученные при компьютерном моделировании результаты анализа НДС во всем объеме колеса вместе с данными о результатах неразрушающего контроля компонентов радиальных $\sigma_r$, осевых $\sigma_o$ и окружных $\sigma_\theta$ остаточных напряжений на поверхности обода колеса могут являться основой для осуществления заводского контроля НДС во всем объеме обода. Работы на кафедре «ТСМИ» МИИТ в этом направлении продолжаются.

Для контроля остаточных напряжений в ЦКК рекомендована методика определения остаточных напряжений неразрушающим магнитоупругим методом с помощью измерителя ИМН - 3. Этот метод основан на явлении изменения магнитной проницаемости среды из ферромагнитного материала при изменении напряженно - деформированного состояния конструкции.

Известно применение этого метода для контроля НДС в машиностроительных конструкциях на поверхности деталей (работы Семыкина В.Н. и др.). В диссертации сформулирована гипотеза о возможности определения остаточных напряжений во всем объеме колеса на основе проведения измерений на поверхности детали и применения номограмм, полученных расчетным путем. Отработана первая часть методики, связанная с экспериментальным измерением остаточных напряжений.

Последовательность проведения измерений заключается в определении расположения местной системы координат, нанесении сетки на исследуемую поверхность с указанием узловых точек, где предполагается проведение измерений, проведении магнитным датчиком измерений разностей главных напряжений и угла наклона направления наибольшего главного напряжения к выбранным осям в узловых точках сетки. Проведены экспериментальные исследования на ВМЗ по оценке остаточных напряжений в ЦКК, прошедших термическую обработку с различными параметрами, показавшие достаточно хорошее их соответствие расчетным данным. Установлено, что схема и уровень остаточных напряжений, экспериментально определяемых на поверхности обода, соответствуют определенному уровню остаточных напряжений в центре обода.

Таким образом, магнитоупругий метод может быть использован для 100 % приемочного контроля остаточных напряжений в ободе ЦКК на заводах изготовителях. Методика контроля остаточных напряжений на основе магнитоупругого метода прошла апробацию на Выксунском металлургическом заводе.

## Выводы и основные результаты работы

1. Анализ состояния вопроса свидетельствует о том, что для обеспечения высокого качества ЦКК необходимо совершенствование методов заводского контроля тепловых процессов и структурообразования при термиче-

ской обработке на основе сочетания инструментальных методов контроля и компьютерного моделирования.

2. Разработана методика и программное обеспечение для компьютерного моделирования тепловых процессов на основе использования метода конечных элементов, в нестационарной и нелинейной постановке. Разработана конечно - элементная модель ЦКК и алгоритм решения задачи теплопроводности и структурообразования в осесимметричной постановке применительно к термической обработке ЦКК, основанная на анализе дилатометрических характеристик, диаграммы анизотермического распада аустенита и структурной диаграммы колесной стали марки 2. Рассмотрены различные схемы охлаждения зоны обода колеса при закалке, которые определяются положением и направлением потока воды спрейеров.

3. Проведено моделирование процессов изменения температуры при закалке в точках обода колеса, находящихся на разном расстоянии от поверхности катания (0,5 - 29,5 мм). Определена кинетика скоростей охлаждения и связанная с ней кинетика изменения структурного состояния в различных точках. Установлено, что в момент окончания закалки на глубине 2 - 3 мм содержится до 95 % мартенсита, которое затем резко убывает и на глубине 5 - 7 мм от поверхности катания снижается до нуля.

4. Установлено, что температура в точке сопряжения гребня с поверхностью катания после закалки зависит от температуры в момент начала закалки, но не зависит от схемы охлаждения и может быть использована для контроля температуры колеса перед закалкой.

5. Установлено, что по окончании процесса закалки обода колеса при последующем охлаждении на воздухе до поступления в отпускную печь активно протекают процессы самоотпуска, связанные с нагревом охлажденных зон за счет распространения теплоты от частей колеса, сохранивших при закалке высокую температуру. Температура в ободе колеса через 700 с после закалки, к моменту поступления в отпускную печь, повышается от 320 $^0$C до 450 $^0$C в зависимости от времени охлаждения при закалке, что удовлетворяет нормативным требованиям.

6. Разработана методика заводского контроля температур начала закалки, времени охлаждения при закалке и соответствия расположения спрейеров относительно обода колеса, основанная на использовании расчетных номограмм и контроля контактной термопарой температур в определенных зонах на поверхности колеса по окончании закалки.

7. В диссертации сформулирована гипотеза о возможности контроля остаточных напряжений во всем объеме колеса на основе проведения измерений на поверхности детали и применения номограмм, полученных расчетным путем. Отработана первая часть методики, связанная с экспериментальным измерением остаточных напряжений. На Выксунском металлургическом заводе магнитоупругим методом проведен контроль остаточных напряжений

в колесах, прошедших термическую обработку с различными параметрами технологического процесса, что подтверждено актом внедрения, приложенным к диссертации. Установлено, что схема и уровень остаточных напряжений, экспериментально измеряемых на поверхности обода, соответствуют определенному уровню остаточных напряжений в центре обода.

8. На основании результатов проведенных исследований сформулированы предложения по совершенствованию системы сквозного контроля качества изготовления колес вагонов на этапе завершающей термической обработки.

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:

1) 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.19-24.

2) Киселев А.С., Мартьянова И.А. Контроль остаточных напряжений в ЦКК вагонов на основе компьютерного моделирования и экспериментальных исследований процесса их изготовления // Безопасность движения поездов: Тез. докл. научно-практич. конф.- МИИТ: - М., 2002. - С. II-12.

3) Мартьянова И.А., Киселев С.Н., Киселев А.С. Модернизация технологического процесса термической обработки цельнокатаных колес // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2002. - № 3. – С. 16-19.

4) Петрухенцева И.А. (Мартьянова И.А.), Киселев С.Н. Оценка напряженно-деформированного состояния цельнокатаных колес вагонов на основе экспериментальных и расчетных данных. // Неделя науки-99: Тез. докл. научно-практич. конф.- МИИТ: - М., 1999. - С. V-20-V-21.

5) Напряженно-деформированное состояние колес грузовых вагонов при термообработке, восстановлении наплавкой и эксплуатационных нагружениях / С.Н. Киселев, А.В. Саврухин, И.А. Петрухенцева (И.А. Мартьянова), А.С. Киселев // Сварка и родственные технологии – в XXI век: Тез. докл. НАН Украины. – Киев, 1998. - С. 56.

6) Моделирование остаточных напряжений и структурообразования в колесах вагонов. / С.Н. Киселев, И.А. Петрухенцева (И.А. Мартьянова), А.В. Саврухин и др. // Тез. докл. 2-й Всерос. научно-техн. конф. – Тула, 1998. - С. 3-4.

7) Саврухин А.В., Петрухенцева И.А. (Мартьянова И.А.), Киселев А.С. Остаточные напряжения в железнодорожных колесах // Повышение динамических качеств подвижного состава и поезда в условиях Сибирского региона: Межвуз. сб. – Омск, 1998. - С. 25-30.

Подписано в печать 1.12.03г. Заказ № 161т. Объем 1.0 п.л. Тираж 100экз.
Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана.