

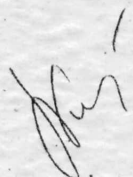
4558506

На правах рукописи

КУЗЬМИНА Галина Дмитриевна

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ И ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ
ВОССТАНОВЛЕНИЯ НАПЛАВКОЙ ГРЕБНЕЙ ЦЕЛЬНОКАТАНЫХ
КОЛЕС ВАГОНОВ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ
ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ И СТРУКТУРНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ**

Специальность 05.03.06 - Технология и машины сварочного производства



Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1998

Работа выполнена в Московском государственном университете путей сообщения (МИИТ)

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор
Воронин И.Н.

Научный консультант - кандидат технических наук, с.н.с.
Киселев А.С.

Официальные оппоненты - д.т.н., проф. **Макаров Э.Л.**

к.т.н., доц. **Шубин Ф.В.**

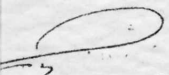
Ведущее предприятие **Всероссийский научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта**

Защита диссертации состоится "2" 04 1998г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета К 053.15.03 в Московском государственном техническом университете имени Н.Э.Баумана по адресу: 107005, Москва, 2-ая Бауманская ул., д.5.

Ваш отзыв на автореферат в 1 экз., заверенный печатью, просим выслать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ

1998г.


Гирш В.И.

1558506

Объем 1 л.л. Заказ № 93
Тип. МГТУ



1558506

Кузьмина Г.Д. Совершенство

ШАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

Актуальность проблемы. В последние годы увеличился износ колес подвижного состава на железных дорогах страны. При ремонтных работах для получения нужного профиля колеса производится переточка обода колеса. При переточке колес, когда за счёт механической обработки получают близкий к исходному профиль гребня колеса, приходится стачивать на 6-8мм с поверхности катания, что сокращает общий срок службы колеса в 3-4 раза. Одной из наиболее часто встречающихся причин преждевременного выхода из строя колес вагонов является местный, в виде подреза, или общий износ гребней до толщины меньше допустимой равной 23мм.

Значительное увеличение интенсивности износа гребней цельнокатанных колес (ЦКК) вагонов на всей сети железных дорог страны, а также острый дефицит запасных частей на железнодорожном транспорте привели к резкому увеличению объема работ по восстановлению наплавкой гребней колес.

Для обеспечения стабильного качества и высокой надежности в эксплуатации восстановленных наплавкой колес вагонов требуется достаточно глубокое научное обоснование, как способа наплавки, так и основных технологических параметров, прежде всего с позиций термического воздействия на материал колеса и возникающие структурные и фазовые превращения. Поэтому работа по обоснованию технологии восстановления наплавкой ЦКК вагонов на основе моделирования термических процессов и структурных превращений является актуальной.

Цель работы. Повышение работоспособности восстанавливаемых наплавкой колес вагонов в эксплуатации на основании разработки рекомендаций по совершенствованию технологии двухдуговой наплавки с использованием методов компьютерного и экспериментального моделирования тепловых процессов, структурных и фазовых превращений.

Методы исследования. Компьютерное моделирование тепловых процессов при наплавке гребней колес с учетом изменения технологических параметров на основе решения нелинейной задачи нестационарной теплопроводности методом элементарных тепловых балансов и использования программного комплекса "Сварка".

Дилатометрические исследования колесной стали марки 2 с использованием установки КАМАТ.

Металлографические исследования структуры металла околошовной зоны (ОШЗ) колесной стали марки 2.

Научная новизна. 1. Проведен анализ термического воздействия многопроходной наплавки колес вагонов для различных точек в ОШЗ на основе разработанной конечноэлементной модели (КЭМ) колеса и уточненной методики компьютерного моделирования тепловых процессов на базе ре-

шения нелинейной нестационарной задачи теплопроводности и метода элементарных тепловых балансов. 2. Разработана методика и проведен анализ структурных превращений в ОШЗ при наплавке гребней колес с учетом влияния на них параметров технологического процесса. Методика основана на использовании результатов компьютерного моделирования тепловых процессов, dilatометрических исследований и построения диаграмм анизотермического распада аустенита и структурных диаграмм колесной стали применительно к диапазону температур и скоростей охлаждения, характерных для ОШЗ при наплавке.

3. Установлена возможность регулирования структурного состава в ОШЗ при двухдуговой наплавке путем изменения параметров сварочного процесса: тепловложения и расстояния между дугами.

4. Впервые дана качественная и количественная оценка структурообразования при наплавке колесной стали. Установлено, что менее 50 % мартенсита в структуре образуется при $W_{6/5} = 30^\circ\text{C}/\text{с}$, а менее 10% - при $W_{6/5} \leq 24^\circ\text{C}/\text{с}$.

5. Установлено, что для аустенизации стали рассматриваемого класса в процессе dilatометрирования при температурах в ОШЗ 800-900°C необходимо время не менее 180с.

Практическая ценность работы. 1. Установлено, что наиболее благоприятные условия с позиции образования стабильных структур создаются при подогреве колеса в зоне наплавки до температуры не ниже 250°C.

2. Установлено, что для обеспечения температурного режима наплавка должна производиться после окончания подогрева не более чем через 180с.

3. Установлено, что независимо от технологических параметров наложения "отжигающего" валика одной дугой в ОШЗ непосредственно у линии сплавления при однослойной наплавке скорости охлаждения $W_{6/5}$ превышают критические, соответствующие образованию 100% мартенсита в структуре. Рекомендовано "отжигающий" валик выполнять также двухдуговым методом.

4. На основе вышеизложенных положений сформулированы и внедрены в производство рекомендации по усовершенствованию технологии восстановления наплавкой гребней колес вагонов в вагонных депо. Владимир Горьковской ж.д. и Ожерелье Московской ж.д. Младший научный сотрудник. Апробация работы. По основным разделам работы сделаны доклады на научном семинаре кафедры "ТСМИ" МИИТ, на научно-технических советах в отделении сварки ВНИИЖТ, кафедры МГТУ им. Баумана, российской научно-технической конференции "Современные проблемы сварочной науки и техники" "Сварка 97".

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов по работе и приложения. Выполнена на 167 машинописных листах, содержит 43 рисунка, 27 таблиц и 72 наименования использованных литературных источников. **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Первая глава. Проведен анализ характера изнашивания гребней колес вагонов в эксплуатации и методов их восстановления наплавкой. Значительное увеличение с 1995 г. на предприятиях МПС количества наплавляемых колес привело к необходимости проведения дополнительных детальных исследований параметров технологического процесса двухдуговой и однодуговой наплавки. Исследования в этом направлении проводились и проводятся во ВНИИЖТе, ИЭС им. Курчатова, МИИТе, ряде других организаций. Специалистами ВНИИЖТа Лозинским В.Н., Калашниковым Е.А., Павловым В.Н. и другими проведены значительные работы по определению оптимального состава металла шва. В излагаемой работе детально рассмотрены процессы, протекающие в ОШЗ, которые определяют конечные свойства сварного соединения.

Проведенный анализ позволил сделать вывод о том, что наиболее стабильное качество при наплавке гребней колес может быть получено при использовании двухдуговой наплавки под флюсом. Однако, в настоящее время для широкого внедрения этого способа на предприятиях МПС необходимо дополнительно уточнить ряд вопросов. Следует определить наиболее рациональное положение оси колесной пары при наплавке гребня, а также определить закономерность распределения температуры после подогрева и влияния технологических перерывов в процессе наплавки на изменения температуры в зоне гребня.

Необходимо уточнить также влияние условий теплоотвода на структурные превращения, а также определить влияние некоторых технологических параметров (изменения величины сварочного тока и напряжения каждой из дуг, расстояния между дугами, начальную температуру подогрева) на термические циклы и структурные превращения.

Проблеме воздействия термических циклов при сварке и наплавке на структуру и свойства материалов посвящено ряд работ. К ним, в частности, относятся работы Ефименко Л.А., Лифшица Л.С., Макарова Ю.Л., Прохорова Н.Н., Шоршорова М.Х., Хакимова А.Н. и ряда других исследователей. Основное внимание при оценке реакции основного металла на термический цикл сварки уделяется процессам в околосшовной зоне (ОШЗ). Здесь происходят наиболее заметные изменения структуры и свойств основного металла: снижение ударной вязкости (вследствие роста зерна, перегрева, полной или частичной закалки), образование горячих или холодных трещин.

Колесная сталь марки 2 относится к группе сталей, которые подвергаются при изготовлении (до сварки или наплавки) термической обработке: нормализации или закалке с отпуском (колесная сталь марки 2 для вагонных колес - закалке с отпуском). После сварки отпуск не предусматривается. По характеру эксплуатационной нагрузки, например, многократный удар при нормальных или отрицательных температурах, решающим является требование высокой сопротивляемости наплавленным колесам хрупкому разрушению. При этом регулирование структуры и механических свойств зон наплавленных гребней колес должно осуществляться в основном в процессе наплавки. В качестве основного критерия расчета параметров технологии и режимов наплавки принимают величину скорости охлаждения W_0 в ОШЗ.

Проведенный анализ опубликованных литературных данных свидетельствует о том, что при изменении содержания углерода в стали и системы легирования, структурные и фазовые превращения в ОШЗ принципиально изменяются. При этом существенно отличаются дилатометрические характеристики, а следовательно и диаграммы анизотермического распада аустенита и структурные диаграммы. Для колесной стали марки 2 имеются весьма ограниченные сведения об этих характеристиках, которые необходимы для научного обоснования технологии наплавки и получения высокого качества наплавленных изделий. В связи с этим в диссертационной работе необходимо было решить следующие задачи:

1. Сформулировать основные положения решения нелинейной задачи нестационарной теплопроводности применительно к процессам наплавки ЦКК вагонов.
2. Разработать конечноэлементные модели для анализа тепловых процессов ЦКК вагонов при восстановлении наплавкой.
3. Провести численное моделирование тепловых процессов и их анализ при наплавке гребней колес при различных параметрах технологического процесса, влияющих на термические циклы в ОШЗ.
4. Провести дилатометрические исследования и построить диаграммы анизотермического распада аустенита колесной стали марки 2 при охлаждении с различными максимальными температур.
5. Провести анализ результатов компьютерного моделирования тепловых процессов с учетом полученных диаграмм для определения скорости охлаждения с целью получения необходимого структурного состава.
6. Разработать рекомендации по совершенствованию технологии двухдуговой наплавки изношенных гребней ЦКК вагонов.

Вторая глава посвящена разработке методики и проведению численного моделирования термического воздействия наплавки на колесо вагона.

Колесо вагона имеет достаточно сложную геометрию и распространение теплоты при наплавке гребня колеса не может быть с достаточной точ-

ностью описано упрощенными моделями. Поэтому требуется проведение моделирования этих процессов при достаточно точном описании как геометрии рассматриваемой детали, так и физической модели тела. Наибольшая точность при этом достигается в случае решения нелинейной нестационарной задачи теплопроводности.

В связи с тем, что наплавка обычно производится со скоростями больше чем 0,7 см/с, при решении задачи о распределении температур в излагаемой работе было принято допущение об осесимметричном поле температур.

Для решения вышеназванной задачи целесообразно использовать современные численные методы и в первую очередь метод конечных элементов (МКЭ), а также метод элементарных тепловых балансов (МЭБ).

Метод элементарных тепловых балансов, изложенный в работах Коздобы Л.А., Куркина А.С., Павловича А.А. основан на законе сохранения энергии. При этом все тело разбивается на элементарные объемы (элементы), отделенные друг от друга и от окружающей среды поверхностями раздела. На этих поверхностях определяются тепловые потоки из элемента в элемент или из элемента в окружающую среду. Изменение количества теплоты в элементе ΔQ за один шаг равно суммарной мощности всех тепловых потоков через границы этого элемента, множенной на время шага Δt ,

$$\Delta Q = \Delta t \sum_{i=1}^n q_i S_i, \quad (1)$$

где q_i - средняя мощность теплового потока через единицу площади поверхности границы элемента S_i ; n - число границ элемента, $q_i S_i$ - тепловой поток через i -тую границу элемента.

В общем случае при наличии у элемента n_0 границ с соседними элементами n_1, n_2 и n_3 внешних границ 1-го, 2-го и 3-го рода с учетом (1) использовано следующее уравнение для определения изменения теплосодержания в объеме любого элемента за малое время Δt :

$$\Delta h_s V_s = \Delta t \left\{ \sum_{i=1}^{n_0} (T_{\text{сг}i} - T_s) \frac{T_{\text{сг}i} - T_s}{d_i} \cos(n_i, d_i) S_i + \sum_{j=1}^{n_1} \lambda (T_{\text{г}j} - T_s) \frac{T_{\text{г}j} - T_s}{d_{\text{г}j}} \cos(n_j, d_{\text{г}j}) S_j + \right. \\ \left. + \sum_{k=1}^{n_2} q_{\text{вн}k} S_k + \sum_{l=1}^{n_3} \alpha_{\text{ср}l} (T_{\text{с}l} - T_s) S_l \right\}, \quad (2)$$

где $S(i, j, k, l)$ - площадь соответствующей границы с соседними элементами или с внешней средой; T_s - температура в геометрическом центре элемента; $T_{\text{сг}i}$ - температура в центре смежного элемента; $T_{\text{г}j}$ - температура на границе; d_i - отрезок, соединяющий центры соседних элементов; n_i, n_j - нормаль к границе; $\cos(n, d)$ - косинус угла между отрезком d и нормалью к границе;

$q_{\text{ср}}$ - скрытая удельная теплота структурных и фазовых превращений; $\lambda(T_{\text{г}})$ - коэффициент теплопроводности при температуре на границе; $\alpha_{\text{г}}$ - коэффициент теплоотдачи на границе.

При решении задачи в осесимметричной постановке количество теплоты, выделяемое за время действия сварочного источника теплоты при наплавке одного слоя за время $t_{\text{слой}}$ определяется соотношением:

$$Q = q \times t_{\text{слой}} = q \times 2 \times \pi \times R / V_{\text{н}}, \quad (3)$$

где $q = I_{\text{св}} \times U_{\text{д}} \times \eta$ - мгновенная мощность источника теплоты; R - средний радиус наплавляемого слоя, $V_{\text{н}}$ - скорость наплавки, $I_{\text{св}}$ - сила сварочного тока, $U_{\text{д}}$ - напряжение на дуге, η - к.п.д. процесса.

Это количество теплоты вводится в объем

$$V = 2 \times \pi \times R \times S, \quad (4)$$

где S - площадь валика в радиальном сечении.

Следовательно, теплосодержание единичного объема в наплавляемом валике с учетом (3) и (4) будет равно:

$$h = \frac{Q}{V} = \frac{U \times I \times \eta}{V_{\text{н}} \times S}. \quad (5)$$

Таким образом, при решении задачи, весь процесс разбивается на стадии, количество которых равно числу наплавляемых валиков. В начале каждой стадии в элементах, моделирующих очередной валик задается теплосодержание, вычисленное по формуле (5). Затем на протяжении времени $t_{\text{слой}}$ рассматривается процесс распространения теплоты от нагретых элементов к более холодным и теплообмен с окружающей средой. Далее эти действия повторяются для следующего валика. При наплавке последнего валика процесс рассматривается до полного остывания детали. В случае рассмотрения двухдугового процесса учитывается введение мощности теплового источника от первой и второй дуги со смещением по времени, соответствующим расстоянию между дугами и скорости наплавки.

Реализация изложенного алгоритма осуществлена на основе использования программного комплекса "Сварка", разработанного в МГТУ им.Баумана и ИАЭ им.Курчатова.

Проведено тестирование разработанного алгоритма и программного обеспечения. Оно показало хорошее соответствие численного решения аналитическому (отклонение не более 10%) в том числе и в зонах с наибольшими градиентами температур.

В зависимости от степени износа гребня колеса предусматривалась возможность наплавки одного, двух или трех слоев. В каждом слое наплавки выделены группы элементов, которые соответствуют последовательно наложению 3-х двухдуговых проходов. Общее количество элементов в модели при решении тепловой задачи было равно 797.

План моделирования включает последовательную оценку воздействия на материал колеса процессов предварительного подогрева, последовательность нанесения швов при наплавке (включая "отжигающий" валик). Моделирование проводится для колес с ободом, изношенным в эксплуатации до толщины $\delta=60\text{ мм}$ и $\delta=35\text{ мм}$. Рассматриваются варианты износа гребня до толщины 30 мм, когда при восстановлении наносится один слой (три прохода + "отжигающий" валик), и до толщины 24 мм, когда двухдуговая наплавка производится в три слоя (9 проходов + "отжигающий" валик).

При этом анализ проводился для элементов, расположенных от линии сплавления 1-го слоя на расстояниях: 1, 2, 3 мм - в вершине гребня, 3,5 мм - в основании гребня.

На рис.1 в качестве примера приведен термический цикл в конечном элементе, расположенном в вершине гребня на расстоянии 3 мм от линии сплавления и изменение скоростей охлаждения от первого прохода при однослойной наплавке. Аналогичные зависимости - $T=f(t)$ и $W_{охл}=\varphi(t)$ получены и подвергнуты анализу для всех вышеуказанных технологических вариантов наплавки, указанных конечных элементов и для каждого прохода наплавки.

В результате анализа полученных данных сформулированы следующие выводы:

1. В результате моделирования тепловых процессов на этапе подогрева обода колеса перед наплавкой гребня установлено, что для обеспечения нормативного уровня температуры подогрева ($T_{под} = 250^{+20}_{-10} \text{ } ^\circ\text{C}$) разрыв во

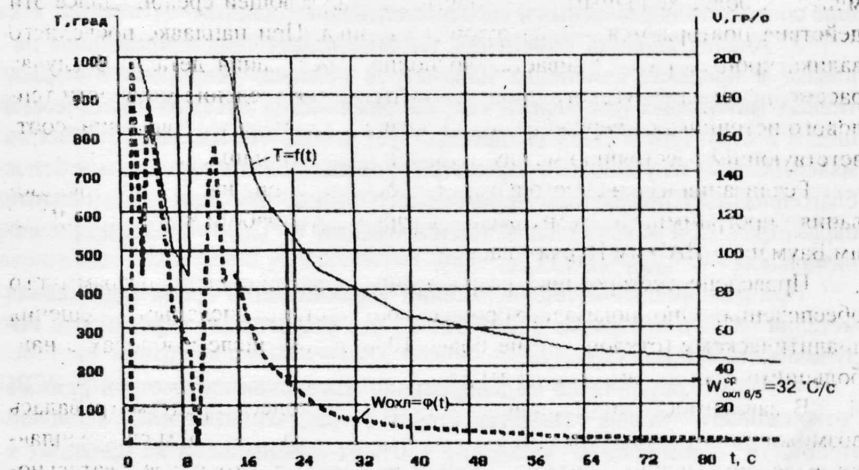


Рис. 1 Термический цикл и скорости охлаждения в конечном элементе после первого прохода

времени между окончанием подогрева и началом наплавки не должен превышать 180с.

Проведенное сравнение результатов расчета с экспериментальными измерениями показало хорошее их соответствие.

2. Анализ результатов моделирования влияния температуры предварительного подогрева на параметры термических циклов и структурные превращения позволяет сделать вывод о том, что для всех исследованных точек ОШЗ подогрев до $T=250^{\circ}\text{C}$ приводит к положительным результатам.

Так, если при наплавке без подогрева $W_{\text{охл6/5}}^{\text{cp}} > 30^{\circ}\text{C/с}$, то при $T_{\text{под}}=250^{\circ}\text{C}$ $W_{\text{охл6/5}}^{\text{cp}} < 10^{\circ}\text{C/с}$.

При наличии предварительного подогрева увеличивается температура в ОШЗ от последующих проходов наплавки и время отпуска при $T=300-500^{\circ}\text{C}$.

В то же время как при наплавке с подогревом так и без подогрева при наложении 4-го валика ("отжигающий" валик) возникают высокие скорости охлаждения $W_{6/5}=50-60^{\circ}\text{C/с}$. Это связано с тем, что в существующей технологии "отжигающий" валик наплавляется одной дугой, с тепловой мощностью соответствующей второй дуге при двухдуговой наплавке. В связи с этим дана рекомендация выполнять "отжигающий" валик также двухдуговым методом.

Проведена верификация разработанной методики и программного обеспечения путем сравнения расчетных данных с экспериментальными данными при двухслойной наплавке гребня обода колеса. Получены хорошие соответствия расчетных и экспериментальных данных.

3. Анализ влияния изменения тепловложения при однослойной наплавке в пределах изменения параметров режима, указанных в нормативных материалах (сварочный ток, напряжение на дуге) на термические циклы и структуру в ОШЗ свидетельствует о том, что наплавка гребня на максимальных из указанных параметрах режима должна приводить к более благоприятным параметрам термического цикла, чем при минимальных параметрах. При максимальном тепловложении $W_{\text{охл6/5}}^{\text{cp}} = 8^{\circ}\text{C/с}$, а при минимальном - $W_{\text{охл6/5}}^{\text{cp}} = 12-13^{\circ}\text{C/с}$.

При максимальном тепловложении увеличивается время пребывания металла ОШЗ в интервале $T=300-500^{\circ}\text{C}$, что увеличивает вероятность получения стабильных структур.

4. Анализ результатов моделирования изменения параметров режима "отжигающего" валика свидетельствует о том, что изменение тепловой мощности "отжигающего" валика на $\pm 30\%$ от номинальной не приводит к существенному изменению скорости охлаждения в ОШЗ.

5. Анализ результатов моделирования трехслойной двухдуговой наплавки гребня для колеса с толщиной обода $\delta=60\text{мм}$ и минимальным тепловложением на всех проходах и для колеса с толщиной обода $\delta=35\text{мм}$ при

максимальном тепловложении, позволяет сделать вывод, что при $\delta=60$ мм и минимальном тепловложении при наложении заключительных валиков нагретого металла в околошовной зоне должен приводить к образованию стабильных структур. При толщине обода $\delta=35$ мм и максимальном тепловложении во всех точках ОШЗ, также создаются условия для образования стабильных структур. Сравнивая результаты, полученные при однослойной и трехслойной наплавке, можно отметить более благоприятную ситуацию с точки зрения возможности образования стабильных структур при трехслойной наплавке.

Полученные в данном разделе результаты анализа термических циклов и скоростей охлаждения в ОШЗ при различных параметрах технологического процесса наплавки, являются основой для дальнейшего проведения исследования структурных изменений на основе дилатометрических исследований и построения диаграмм анизотермического распада аустенита.

Третья глава посвящена разработке методики проведения дилатометрических исследований и построения диаграмм анизотермического распада аустенита (А) колесной стали.

В результате проведенного анализа установлено, что за основу могут быть приняты методики МГТУ им. Баумана и ИМЕТ-ЦНИИЧЕРМЕТ. В дальнейшем изложении работы преимущественно используется методика МГТУ им. Баумана, в которой благодаря дифференцированию дилатометрической характеристики представляется возможным более точно установить температурные границы различных структурных превращений.

При обработке методики уточнено ряд положений известных методик применительно к исследованию углеродистых сталей типа колесной стали марки 2. В частности, определено время необходимое для аустенизации стали при $T_{\max}=850^{\circ}\text{C}$ равно $t_{\text{наг.}}=180\text{с}$, а также определен размер образцов на которых реализуется процесс закалки при воздействии термического цикла в случае охлаждения образца потоком газа. Установлено, что время распада мартенсита (М) на феррито-цементитные смеси при нагреве предварительно закаленной углеродистой стали до температур среднего и высокого отпуска ($T=300-500^{\circ}\text{C}$) составляет незначительные доли секунды, то есть происходит практически мгновенно. Это означает, что при воздействии повторных термических циклов сварки при $T_{\text{наг.}}=300-500^{\circ}\text{C}$ на ОШЗ, претерпевающую превращение $A \rightarrow M$ выдержка даже в несколько секунд должна приводить к распаду М на феррито-цементитные смеси.

При записи дилатограмм при охлаждении колесной стали с максимальных температур $T_{\max}=850, 1150, 1250^{\circ}\text{C}$ время охлаждения в интервале температур $800-500^{\circ}\text{C}$ $t_{8/5}$ изменялось в пределах от $t_{8/5}=3,5\text{с}$ до $t_{8/5}=38\text{с}$, а скорости охлаждения в интервале температур $T=600-500^{\circ}\text{C}$ $W_{6/5}$ соответ-

ственно от $55,6^{\circ}\text{C}$ до $4,2^{\circ}\text{C}/\text{с}$ (работа проведена совместно с аспирантом Куликовым А.А.). Согласно литературным данным при анализе дилатграмм и кривых скорости дилатации принималось, что структурные превращения соответствуют следующим температурным диапазонам для рассматриваемой стали: феррито-перлитное (Ф-П) $\approx 700-400^{\circ}\text{C}$; бейнитное (Б) $\approx 500-300^{\circ}\text{C}$; мартенситное $\leq 250^{\circ}\text{C}$. На основании анализа дилатграмм определены интервалы температур структурных превращений, которые явились основой для построения диаграмм анизотермического распада аустенита (АРА) при охлаждении с $T_{\text{max}} = 1250, 1150$ и 850°C . На рис. 2 приведена диаграмма АРА с $T_{\text{max}} = 1250^{\circ}\text{C}$.

Анализ диаграмм АРА позволяет сделать вывод, что минимальная скорость охлаждения $W_{6/5}$, приводящая к возникновению в структуре 95-100% М соответствует значению $\approx 37,8^{\circ}\text{C}/\text{с}$. Эта минимальная критическая скорость соответствует участку околосшовной зоны, который при наплавке гребня колеса нагревается до $T_{\text{max}} = 1240-1250^{\circ}\text{C}$. Поэтому для дальнейшего анализа результатов компьютерного моделирования с позиции возможных структурных превращений в качестве критической скорости, приводящей к 100% М в структуре следует принимать $38^{\circ}\text{C}/\text{с}$.

Согласно рекомендациям ряда работ вероятность возникновения трещин достаточно велика уже при наличии в структуре 50% мартенсита, поэтому при анализе структурных превращений в околосшовной зоне следует ориентироваться при определении оптимальных параметров теплового воздействия дуги на критические скорости охлаждения, соответствующие образованию мартенсита в структуре существенно меньше 50%.

Эти величины определены ниже в результате построения структурных диаграмм. Полученные выше данные дилатометрирования и диаграммы анизотермического распада аустенита являются исходной информацией для построения структурных диаграмм колесной стали марки 2. Построе-

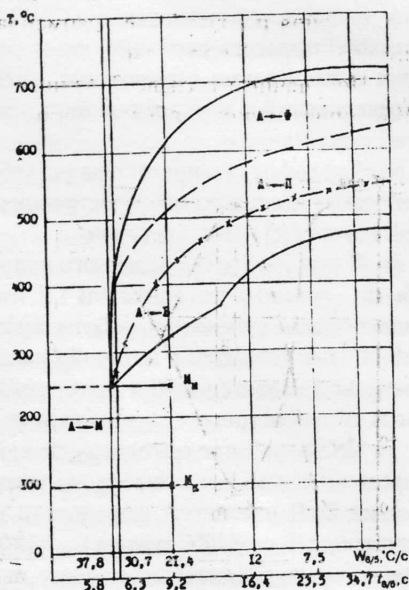


Рис. 2 Диаграмма анизотермического распада аустенита колесной стали марки 2 с $T_{\text{max}} = 1250^{\circ}\text{C}$

ние структурных диаграмм проводилось по методике, изложенной в работах Макарова Э.Л. Структурные диаграммы построены для $T_{\max}=850; 1150; 1250^{\circ}\text{C}$. На рис.3 приведена структурная диаграмма для $T_{\max}=1250^{\circ}\text{C}$. Верификация полученных результатов по структурным составляющим в колесной стали марки 2 при охлаждении с различных $T_{\max}$ проведена путем измерения микротвердости и анализа микроструктур.

Получено хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных. Отличие составляет не более 7%.

Глава четвертая посвящена анализу структур при наплавке гребней вагонных колес на основе изложенных выше результатов компьютерного моделирования и разработке рекомендаций по совершенствованию технологии двухдуговой наплавки.

Полученные в главе 3 данные о критических скоростях охлаждения $W_{6/5}$, приводящих к образованию закалочных структур в колесной стали

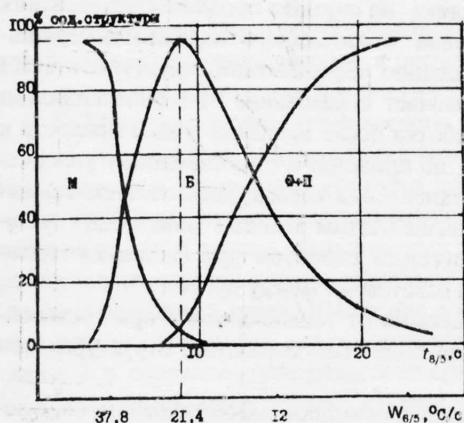


Рис. 3 Структурная диаграмма для колесной стали марки 2 с $T_{\max}=1250^{\circ}\text{C}$

граммам.

Проведенный анализ позволил установить, что при предварительном нагреве до 250°C в околошовной зоне существенно снижаются скорости охлаждения и соответственно образуются более благоприятные структуры. Так если после первых проходов наплавки без подогрева в зоне термического влияния на расстоянии 1-3 мм от линии сплавления в структуре содержится более 50% М и 15-56% Б, то при наличии подогрева в той же зоне в структуре содержится от 10 до 65% Б и мартенситной структуры не образуется. Наложение последующих проходов при наплавке приводит в той же зоне к нагреву до температуры выше $300-400^{\circ}\text{C}$ с выдержкой при

марки 2 при наплавке, позволяют провести дополнительный анализ структурных превращений на основе результатов компьютерного моделирования тепловых процессов при наплавке, приведенных в главе 2.

При этом принималось, что при $W_{6/5}=38^{\circ}\text{C/c}$ в ОШЗ имеет место участок, содержащий в структуре 100% М, а при $W_{6/5}=30^{\circ}\text{C/c}$ содержание мартенсита в структуре около 50%. При других значениях $W_{6/5}$ данные о структурном составе определялись по структурным диа-

этих температурах от 10 до 100 с, что должно приводить к распаду закалочных мартенситно-бейнитных структур с образованием феррито-цементитных смесей с более высокой пластичностью. Исключение составляет зона в основании гребня под наплавленным "отжигающим" валиком, в котором независимо от наличия или отсутствия подогрева образуется 100% мартенсита. При отсутствии подогрева реализуется скорость $W_{6/5} \approx 95^\circ\text{C}/\text{с}$, что значительно больше установленного нами критического значения равного $38^\circ\text{C}/\text{с}$, а при наличии подогрева $W_{6/5} = 58^\circ\text{C}/\text{с}$, что ниже, чем в предыдущем случае, но достаточно для образования в этой зоне 100% М.

Установлено, что изменение параметров режима наплавки в пределах, указанных в нормативных документах, не оказывает существенного влияния на структурный состав в ОШЗ. Изменение параметров режима односторонней наплавки "отжигающего" валика не снимает проблемы образования 100% М в ОШЗ.

Установлено также, что изменение тепловложения в пределах $\pm 30\%$ при наложении "отжигающего" валика не снимает проблемы образования 100% М под этим валиком. Смещение "отжигающего" валика к центру наплавки может содействовать устранению мартенситной структуры в ОШЗ основания гребня, однако не исключает образование М в зоне наплавки "отжигающего" валика. Термообработка после наплавки может привести к исключению закалочных структур, но приводит к существенному увеличению технологического цикла восстановления колеса. Значительное снижение количества мартенсита под наплавленным валиком может быть получено в случае наплавки его двухдуговым способом при снижении тепловложения на 50% и при изменении расстояния между дугами.

Установлено также, что независимо от тепловложения при трехслойной наплавке гребней имеют место более благоприятные структуры, чем при однослойной наплавке.

Полученные в главах 2 и 4 данные позволили сформулировать следующие основные рекомендации по совершенствованию технологии наплавки гребней колес вагонов.

1. Наплавку гребней под флюсом следует производить при вертикальном положении оси колесной пары без зачистки шлаковой корки во время прохода.

2. Для обеспечения условий образования менее 50% мартенсита в структуре рекомендовать температуру подогрева перед наплавкой $T_{\text{под}} = 250_{-10}^{+20} \text{ } ^\circ\text{C}$.

3. Интервал между окончанием подогрева и началом наплавки не должен превышать 180сек.

4. Рекомендовать проведение процесса наплавки при параметрах тепловложения близких к максимальным, так как при этом $W_{6/5}$ снижается с $9-20^\circ\text{C}/\text{с}$ до $7-12^\circ\text{C}/\text{с}$.

5. При отсутствии перерывов между наложением отдельных проходов допускается проведение наплавки без сопутствующего подогрева.

6. Наплавку "отжигающего" валика производить двумя дугами при пониженном на 50% тепловложении и с уменьшением расстояния между дугами до 35 мм.

7. Целесообразно проведение термической обработки после наплавки с нагревом обода колеса газовыми горелками инфракрасного излучения длительностью 50-60 мин.

Изложенные выше соображения получили свое отражение в технологической инструкции.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ.

1. В результате проведенного анализа установлено, что наиболее перспективной является двухдуговая наплавка изношенных гребней колес под слоем флюса.

Установлено, что для обеспечения стабильного и высокого качества восстановленных колес вагонов в эксплуатации требуется обоснование и уточнение ряда параметров технологического процесса наплавки.

2. Проведен анализ термического воздействия многопроходной наплавки колес вагонов для различных точек в ОШЗ на основе разработанной КЭМ колеса и уточненной методики компьютерного моделирования тепловых процессов на базе решения нелинейной нестационарной задачи теплопроводности и метода элементарных тепловых балансов. Уточнены параметры термических циклов, величины скоростей охлаждения, время пребывания различных точек ОШЗ выше определенных температур, что легло в основу проведения dilatометрических исследований колесной стали марки 2 и корректировки ряда положений технологии наплавки гребней ЦКК. На основе проведенного анализа уточнен ряд основных параметров технологического процесса наплавки гребней ЦКК вагонов.

Проведена верификация разработанной методики и программного обеспечения путем сравнения расчетных данных с экспериментальными данными при двухслойной наплавке гребня обода колеса. Получены хорошие соответствия расчетных и экспериментальных данных.

3. Разработана методика и проведен анализ структурных превращений в ОШЗ при наплавке гребней колес с учетом влияния на них параметров технологического процесса. Методика основана на использовании результатов компьютерного моделирования тепловых процессов, dilatометрических исследований и построения диаграмм анизотермического распада аустенита и структурных диаграмм колесной стали применительно к диапазону температур и скоростей охлаждения, характерных для ОШЗ при наплавке.

Проведена верификация результатов построения структурных диаграмм путем сравнения структурного состава стали, представленного на диаграммах с результатами измерения микротвердости и последующей обработки этих измерений на компьютере по программе МГТУ.

Отличие расчетных и экспериментальных данных не превышает 7%.

4. Установлена возможность регулирования структурного состава в ОШЗ при двухдуговой наплавке путем изменения параметров сварочного процесса: тепловложения и расстояния между дугами.

При уменьшении тепловложения на 50% и изменении расстояния между дугами с 55 до 35 мм $W_{6/5}$ может быть снижена с 50-70°C/с до 24-25°C/с.

5. Впервые дана качественная и количественная оценка структурообразования при наплавке колесной стали. Установлено, что менее 50 % мартенсита в структуре образуется при $W_{6/5} \leq 30^\circ\text{C/с}$, а менее 10% - при $W_{6/5} \leq 24^\circ\text{C/с}$.

6. При отработке методики дилатометрических исследований уточнен ряд положений известных методик применительно к исследованию колесной стали. В частности, определено время необходимое для аустенизации стали при $T_{\text{max}} = 850^\circ\text{C}$ равное 180с, а также определен размер образцов, на которых реализуется процесс закалки при воздействии термического цикла в случае охлаждения образца потоком газа. Получены дилатометрические характеристики этой стали в широком диапазоне температур ОШЗ (1250-850°C) и скоростей охлаждения.

7. Установлено, что для обеспечения нормативного уровня температуры подогрева разрыв во времени между окончанием подогрева и началом наплавки не должен превышать 180с.

Анализ результатов моделирования влияния температуры предварительного подогрева на параметры термических циклов и структурные превращения позволяет сделать вывод о том, что для всех исследованных точек ОШЗ подогрев до $T = 250^\circ\text{C}$ приводит к положительным результатам.

Проведенное сравнение результатов расчета температурных полей с экспериментальными измерениями показало хорошее их соответствие.

8. Анализ влияния изменения тепловложения при наплавке на термические циклы и структуру в ОШЗ, свидетельствует о том, что наплавка гребня на максимальных рекомендованных параметрах режима должна приводить к более благоприятным характеристикам термического цикла, чем при минимальных параметрах. При максимальном тепловложении $W_{6/5}^{\text{cp}} = 8^\circ\text{C/с}$, а при минимальном - $W_{6/5}^{\text{cp}} = 12 - 13^\circ\text{C/с}$.

9. На основе проведенных исследований сформулированы рекомендации по совершенствованию технологического процесса наплавки гребней колесных пар, которые введены в инструкцию по наплавке, утвержденную

департаментом вагонного хозяйства МПС РФ и рекомендованную к применению в вагонных депо.

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:

1. Компьютерное моделирование технологии наплавки цельнокатаных колес / С.Н. Киселев, Г.Д. Кузьмина, А.С. Киселев и др. // Состояние и перспективы восстановления и упрочнения деталей машин: Тез. докл. - М., -1994. - С. 12-14.

2. Метод оценки ресурса сварных конструкций на основе теории распознавания образов / С.Н. Киселев, Н.Н. Воронин, Г.Д. Кузьмина и др. // Актуальные проблемы прочности: Тез. докл. -Новгород, -1994. - С. 10-12.

3. Effect of preheating when hardfacing all - rolled wagon wheels on residual Stresses and strains / S.N. Kiselev, A.V. Savrukhn, G.D. Kuz'mina, A.S. Kiselev // Welding International. -1996. - N10(6). - С. 480-483.

4. Киселев С.Н., Киселев А.С., Кузьмина Г.Д. Решение нелинейных задач нестационарной термоупругопластичности применительно к сварке и наплавке конструктивных элементов // Прикладная физика: Межотраслевой научнотехнический сборник. -М., -1994. - N3. - С. 33-38.

5. Влияние подогрева при наплавке цельнокатаных колес вагонов на остаточные напряжения и деформации / С.Н. Киселев, А.В. Саврухин, Г.Д. Кузьмина и др. // Сварочное производство. -1995. - N12. - С. 5-7.

6. Воронин Н.Н., Кузьмина Г.Д., Киселев А.С. Температурные поля при восстановлении колес вагонов наплавкой. // Современные проблемы сварочной науки и техники: Тез. докл. - Воронеж, -1997. - С. 8-10.

7. Кузьмина Г.Д., Воронин Н.Н., Киселев С.Н. Структурные превращения в колесной стали марки 2, вызванные термическим сварочным циклом // Современные проблемы сварочной науки и техники: Тез. докл. - Воронеж, -1997. - С. 10-11.

8. Теоретические и экспериментальные исследования технологии двухдуговой автоматической наплавки под слоем флюса изношенных гребней цельнокатаных вагонных колес / С.Н. Киселев, А.С. Киселев, Г.Д. Кузьмина и др. // Конструктивно-технологическое обеспечение надежности колес рельсовых экипажей. Сб. научных трудов. -Спб., -1997. - С. 45-53.

9. Дилатометрические характеристики и диаграммы анизотермического распада аустенита колесной стали марки 2 / Г.Д. Кузьмина, С.Н. Киселев, Н.Н. Воронин и др. // Сварочное производство. -1997. - N12. - С. 3-5.