

На правах рукописи

Пономарев Алексей Иванович

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ
ПОВЕРХНОСТЕЙ КАЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ
НАВАРКОЙ ПРОВОЛОКОЙ**

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 техническом университете им. Н.Э. Баумана.

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент
Дубровский В.А.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Ямпольский В.М.
доктор технических наук, профессор
Поляченко А.В.

Ведущая организация – КЗ “Ремпутьмаш” Филиал ОАО РЖД.

Защита состоится «13» мая 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.

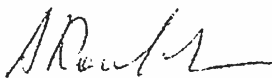
Ваш отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный печатью
организации, просим высылать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ имени Н.Э.
Баумана.

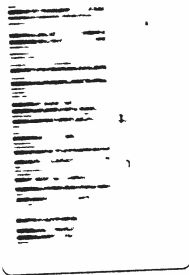
Телефон для справок: 267-09-63.

Автореферат разослан «7» апреля 2004 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент



А.В. Коновалов



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В современной промышленности уделяется особое внимание качеству ремонта деталей машин и технологиям их восстановления. С точки зрения экономической эффективности оправдано восстановление деталей сложного конструктивного исполнения, к которым относятся детали с изнашиваемыми поверхностями качения. Однако, восстановление таких поверхностей не получило широкого распространения.

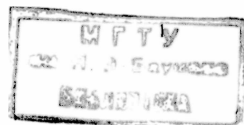
Анализ существующих технологий восстановления показывает, что сдерживающим фактором для восстановления поверхностей качения являются высокие требования, предъявляемые к ним, а именно, высокая твердость: HRC 58 – 63, большая глубина упрочнения: 1,1 – 1,3 мм, малая шероховатость: $R_a = 0,8$ мкм и отсутствие пор. Одним из перспективных способов восстановления поверхностей качения, наиболее полно удовлетворяющих указанным требованиям, является электроконтактная наварка проволокой оплавлением (ЭКНП). Реализация механизма наварки с оплавлением присадочной проволоки обеспечивает получение качественного соединения, то есть, соединения с наличием общих зерен и незначительным перемешиванием основного и наваренного металла. Однако слой наваренного металла после ЭКНП характеризуется структурной неоднородностью: закаленные участки чередуются с отпущенными участками пониженной твердости. Влияние структурной неоднородности на износостойкость такого слоя в условиях трения качения, а также вопросы, связанные с возможностью управления структурной неоднородностью в процессе ЭКНП и после ЭКНП за счет поверхностного пластического деформирования (ППД) без ухудшения качества соединения, на сегодня мало изучены и требуют проведения дополнительных исследований.

В связи с изложенным, разработка технологии восстановления поверхностей качения электроконтактной наваркой проволокой оплавлением представляется актуальной задачей.

Целью работы является повышение износостойкости деталей с поверхностями качения при восстановлении с помощью ЭКНП оплавлением.

Для достижения намеченной цели необходимо решить следующие задачи:

- изучить механизм формирования разупрочнённых зон при электроконтактной наварке и выявить основные факторы, влияющие на характеристики твердости поверхностного слоя (ширину разупрочнённых зон после наварки, максимальное снижение твердости в зонах разупрочнения, максимальную глубину закалки);
- экспериментально исследовать влияние режимов ЭКНП на характеристики твердости поверхностного слоя после наварки и определить диапазон режимов, в пределах которого возможно управление этими



характеристиками без снижения качества соединения основного и наваренного металлов;

- разработать дополнительные технологические мероприятия ППД, позволяющие повышать и износостойкость поверхностей качения, восстановленных ЭКНП;

- разработать технологию восстановления деталей с поверхностями качения и довести результаты работы до промышленного применения.

Методы исследования. Основные задачи работы решались на основе сочетания теоретических и экспериментальных методов исследования.

Для выявления основных факторов влияния на характеристики твердости было проведено теоретическое исследование механизма формирования разупрочненных зон и процесса осадки присадочной проволоки за время импульса.

Теоретический расчёт электротепловой обстановки в зоне наварки осуществлялся с помощью метода конечных элементов на ПЭВМ. Проверка адекватности данной математической модели проводилась по исследованию зон термического влияния на макрошлифах.

Экспериментальное исследование влияния параметров режима ЭКНП на характеристики поверхностной твердости проводилось на установке УЭН – 01 с применением аппарата планирования эксперимента. Измерения твердости и микротвердости проводились на интерференционном приборе Виккерса 270 и твердомере ПМТ, исследования структуры – по макрошлифам с использованием оптического микроскопа МИМ – 8 и цифрового микроскопа INTEL QX3.

Сравнительные испытания контактной прочности и износостойкости осуществлялись на сконструированной установке, имитирующей кинематический тип сопряжения карданной передачи.

Измерение шероховатости наваренных и обкатанных поверхностей выполнялось на профилометре “Калибр-201”.

Научная новизна работы.

1. Разработана и теоретически-экспериментально обоснована математическая модель формирования разупрочненных зон при ЭКНП. Установлено, что с уменьшением скорости наварки и длительности пауз неравномерность поверхностной твердости по длине навариваемой детали возрастает за счет увеличения циклов отпуска у боковых кромок валиков наваренного металла.

2. Установлено, что с увеличением расхода охлаждающей воды ширина зон локального разупрочнения уменьшается, но глубина упрочнения наваренной детали остается неизменной. Это связано с тем, что при удалении от поверхности вглубь навариваемой детали роль поверхностного охлаждения в распределении температур снижается и увеличивается влияние внутренних источников теплоты (джоулева тепла).

3. Выявлено, что при повышении контактных напряжений начинают появляться следы разрушения поверхности наваренного металла в зонах локального разупрочнения. Это связано с увеличением растягивающих касательных напряжений, действующих в зонах перехода структур. С увеличением радиуса профиля ролика величина растягивающих касательных напряжений снижается, и следы разрушения перестают появляться. При обкатке следует выбирать такой радиус профиля, чтобы ширина контакта ролика с обрабатываемой поверхностью превышала ширину зон отпуска.

Практическая ценность работы. Разработана технология восстановления поверхностей качения с применением ЭКНП оплавлением и последующего поверхностного пластического деформирования, которая позволяет получать износостойкие поверхности качения.

Реализация результатов работы. Разработанная технология была опробована и внедрена на НПП “ВЕЛД” с экономическим эффектом 361350 рублей за 2001г.

Апробация работы. Основные положения работы доложены на 1-й Российской конференции молодых ученых по математическому моделированию (г. Калуга, 2000г.); на региональной научно-технической конференции “Прогрессивные технологии, конструкции и системы в приборо- и машиностроении” (г. Калуга, 2000г.); на Всероссийской научно-технической конференции “Прогрессивные технологии, конструкции и системы в приборо- и машиностроении” (г. Калуга, 2002г.); на научном семинаре кафедры М2 – КФ “Технологии сварки” КФ МГТУ имени Н. Э. Баумана (г. Калуга, 2002г.); на научном семинаре кафедры МТ-7 “Технологии сварки и диагностики” МГТУ им. Н.Э. Баумана (г. Москва, 2003г.).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 7 печатных работ.

Объём и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, списка литературы и приложения. Она изложена на 213 страницах машинописного текста, содержит 63 рисунка, 29 таблиц и 167 наименований литературных источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Анализ изнашиваемых деталей с поверхностями качения, подвергаемых восстановлению, показал, что они, как правило, имеют величину износа от нескольких десятых долей до одного миллиметра. Например, статистическая обработка проведенного микрометража изношенных цапф полукрестовин карданной передачи электропоездов метро с вероятностью 0,95 позволяет утверждать, что среднее значение износа цапф находится в интервале от 0,218 до 0,297 мм, а выборочные измерения

изношенных цапф крестовин электровоза ЧС – 2 показывают, что их износ доходит до 1 мм.

Для обеспечения контактной выносливости поверхностей качения в процессе эксплуатации при изготовлении к ним предъявляются высокие требования по твердости: HRC 58 – 63, по шероховатости: $R_a = 0,8$ мкм и глубине упрочнения: 1,1 – 1,3 мм. Анализ технологий восстановления, выполненный на основе работ Клименко Ю.И., Черноиванова В.И., Куликова Г.Д., Грабина В.Ф., Дубровского В.А. и др., показал, что электроконтактная наварка проволокой оплавлением наиболее полно соответствует требованиям, предъявляемым к поверхностям качения. Использование присадочной проволоки с содержанием 0,6 – 0,65 % углерода позволяет получать слои наваренного металла с твердостью HRC 50 – 60. Глубина закаленной зоны в основном металле после ЭКНП достигает 1,5 – 2 мм.

Анализ технологических вариантов ЭКНП и применяемого оборудования показал, что для снижения затрат на внедрение процесса наварки поверхностей качения, а также расширения технологических и исследовательских возможностей процесс целесообразно реализовывать на установке УЭН-01 двумя проволоками по однозаходному варианту.

Из работ Клименко Ю.И., Аскинази Б.М. известно, что особенностью структуры слоя наваренного металла, полученного из углеродистой проволоки (например, из стали 65Г) является наличие разупрочнённых зон со структурой отпускаемого мартенсита. На основании выводов, сделанных в работах Пинегина С.В., Корсакова В.С., можно предположить, что основной причиной снижения контактной выносливости и износостойкости поверхностных слоёв после ЭКНП в условиях трения качения, вероятно, могут являться границы перехода от закаленного металла к отпущенному, играющие роль концентраторов опасных растягивающих напряжений. Как показали проведенные предварительные испытания наваренных образцов на контактную прочность, в местах перехода структур наблюдается растрескивание металла. Вопрос влияния структурной неоднородности после ЭКНП на контактную прочность в условиях трения качения на сегодняшний день остаётся малоисследованным и требует дальнейшей проработки.

Анализ способов дополнительной технологической обработки слоев после ЭКНП, проведенный по работам Полевого С.Н., Евдокимова В.Д., Одинцова А.Г., Филиева А.П. и др., позволяет заключить, что наиболее перспективным является поверхностное пластическое деформирование (ППД), обладающее широкими технологическими возможностями и не требующее привлечения дополнительного оборудования. В частности, один из видов ППД, обкатка роликом, может выполняться на базе токарного станка с использованием относительно простых приспособлений. Повышение износостойкости наваренных поверхностей за счет ППД может быть связано с выравниванием твердости поверхности после ЭКНП, так как

известно, что более мягкий металл имеет большую степень упрочнения при ППД, чем металл с более высокой твердостью.

Глава 2. В работах Клименко Ю.И., Аскинази Б.М., Каракозова Э. С. и др. показано, что периодически появляющееся по длине локальное разупрочнение вызвано термическим циклом электроконтактной наварки. Теоретическое исследование механизма формирования разупрочненных зон проводилось по следующей расчетной схеме (рис. 1). Отдельная контактная площадка 2 образуется в результате деформации присадочной проволоки за время электромеханического цикла наварки. Сплошной валик 1 наваренного металла формируется за счет перекрытия единичных контактных площадок. Слой наваренного металла формируется за счет частичного перекрытия валиков наваренного металла, накладываемых по винтовой линии вдоль поверхности детали. Объемы металла 3 контактных площадок из углеродистой стали, претерпевающие в процессе нагрева аустенитное превращение, после прекращения действия импульса сварочного тока охлаждаются с достаточно высокой скоростью, что приводит к их закалке. В ранее закаленных объемах металла, нагреваемых последующими импульсами сварочного тока до меньших температур, происходят процессы частичного отпуска. По сравнению с объемами 5 металла, расположенными на оси навариваемого валика, объемы 4 металла, расположенные у боковой кромки валика, претерпевают большее число циклов отпуска, и, следовательно, сильнее разупрочняются (рис. 1). Ширина этих зон h_{omn} определяется расположением изотерм начала аустенитного превращения (T_{Ac3}) и мартенситного превращения (T_{Mn}) при высокоскоростном нагреве, а степень разупрочнения определяется количеством циклов отпуска. Скорость нагрева и охлаждения в значительной мере связаны с расходом охлаждающей воды при наварке, а количество циклов отпуска преимущественно зависит от скорости наварки и длительности пауз между импульсами.

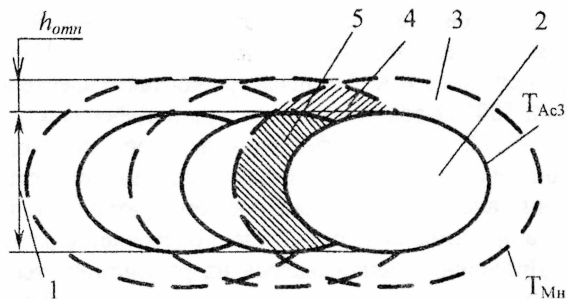


Рис. 1. Схема формирования валика наваренного металла.

Расчётные модели температурных полей применительно к электроконтактной наварке проволокой разрабатывались в работах Каракозова Э. С., Прохорова Н. Н., Молчанова Б. А. и других авторов. В данных моделях в качестве основных факторов влияния на распределение температур были выбраны параметры цикла импульсов тока, перекрытие контактных площадок и теплоотдача с поверхности навариваемой детали. Указанные модели не учитывали влияние внутренних джоулевых тепловых источников на распределение температурного поля, что может привести к погрешностям в определении температур, особенно в глубине навариваемой детали. Поэтому для расчета электротепловой обстановки в зоне наварки была разработана модель, которая учитывала влияние джоулевых тепловых источников и основывалась на дифференциальном уравнении Лапласа:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0, \quad (1)$$

и на дифференциальном уравнении теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{j^2 \rho}{c\gamma}, \quad (2)$$

$$j(x, y, z) = \frac{1}{\rho} \sqrt{\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)^2}, \quad (3)$$

где φ – электрический потенциал точек расчетной области; где T – температура расчетной области; x, y, z – координаты в прямоугольной системе координат; t – время; ρ – удельное электросопротивление; $c\gamma$ – объемная теплоемкость; j – плотность тока.

Навариваемая деталь была схематизирована как полубесконечное тело. Область ввода тепла ограничивалась контактной площадкой круглой формы. На поверхности полубесконечного тела вне зоны контакта задавалось граничное условие 3 – го рода, учитывающее поверхностную теплоотдачу, вызванную водяным охлаждением. Коэффициент поверхностной теплоотдачи задавался в диапазоне: 30000 – 90000 Вт/м² К, соответствующем экспериментальным данным работ Каракозова Э.С., Латыпова Р.А., Молчанова Б.А. Температура контакта электрод – проволока задавалась равной 500° С, так как температура нагрева электрода не должна превышать 450 – 500° С во избежание переноса бронзового сплава в наваренный слой. На условных границах расчётной области внутри тела температура принималась равной начальной температуре детали.

При расчете принималось допущение о постоянстве размеров и формы зоны контакта. Допущение основывалось на результатах теоретического и экспериментального исследования осадки проволоки (Св 08Г2С, диаметром 1,6 мм), выполненного совместно с Зыбиным И.Н. Исследования показали, что для режимов, обеспечивающих качество соединения, интенсивность

увеличения контактной площадки велика только в начальные моменты цикла импульса: в период, равный 10 – 14 % от длительности импульса.

Расчет электротепловой обстановки в зоне наварки единичной контактной площадки проводился методом конечных элементов с применением ПЭВМ. Предполагаемые размеры зон термического влияния на картине рассчитанного температурного поля (рис. 2) определялись по месту расположения изотерм начала аустенитного превращения при нагреве (T_{Ac3}) и начала мартенситного превращения при отпуске (T_{Mn}).

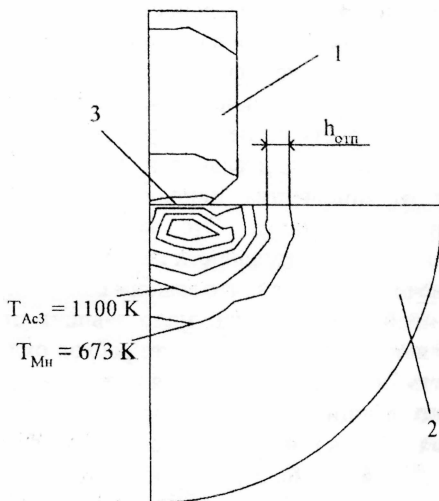


Рис.2. Картина температурного поля в момент окончания импульса ($t_u = 0,1\text{ с}$; $\alpha = 30000\text{ Вт/м}^2\text{ К}$; $j_s = 4 \cdot 10^8\text{ А/м}^2$; 1 – электрод; 2 – половина расчетной области; 3 – зона контакта электрод-деталь)

По данным Шепеляковского К.З., Белоуса М.В., Черенина В.Т. скоростной электроконтактный нагрев приводит к повышению температуры начала аустенитного превращения, в частности, в сталях 45, 40Х: при скорости 600 °C/с до 820 °C ($\approx 1100\text{ K}$), а температуры начала мартенситного превращения при той же скорости – до 400 °C (673 K). Расчет также показал, что скорость нагрева точек, принадлежащих изотермам 820 °C и 400 °C , находится в диапазоне $6000 - 8000\text{ °C/с}$, а скорость их охлаждения лежит в диапазоне $500 - 7000\text{ °C/с}$. Полученные значения скоростей охлаждения позволяют говорить о формировании мартенситной структуры закалки в зоне температур 820 °C и выше.

Максимальная степень разупрочнения $R_{\Sigma, \max}$ оценивалась с учетом расчетных данных термического цикла и использования параметра Холломона-Джейфа по зависимости:

$$P_{\Sigma, max} = T_{эвб} \cdot \left(C + K \cdot \lg \left[n \cdot \frac{T_{max}}{T_{эвб}} \cdot t_u \right] \right) \cdot 10^{-3}, \quad (4)$$

где $T_{эвб}$ – среднеинтегральная эквивалентная температура для каждого цикла отпуска; T_{max} – максимальная температура циклов отпуска, равная для каждого цикла температуре начала аустенитного превращения при нагреве; n – количество циклов отпуска, претерпеваемых одним и тем же объемом металла; C, K – коэффициенты; t_u – длительность импульса тока.

Расчет по уравнению (4) показал, что для постоянных коэффициентов $K = 7$, $C = 14$ и $n = 3$ с увеличением длительности импульса тока от 0,06 до 0,12 с степень разупрочнения зон отпуска возрастает приблизительно от 8 до 11 HRC. При тех же значениях коэффициентов K и C , но постоянной длительности импульса $t_u = 0,1$ с, увеличение числа эквивалентных циклов отпуска от 1 до 7 приводит к росту степени разупрочнения от 7 до 12 HRC. Таким образом, кроме силы и длительности импульсов тока степень разупрочнения зависит от количества циклов отпуска, претерпеваемых одним и тем же объемом металла. Это количество уменьшается с увеличением скорости наварки и длительности пауз между импульсами.

Произведённые расчёты показали, что максимальная глубина залегания изотермы, ограничивающей зону закалки, мало зависит от коэффициента поверхностной теплоотдачи. Отсюда следует, что расход охлаждающей воды должен мало влиять на глубину упрочнения слоя навариваемой детали.

С увеличением коэффициента поверхностной теплоотдачи граница зоны отпуска (изотерма 673 К) на поверхности полубесконечного тела приближается к зоне контакта 3 (рис. 2), а ширина $h_{отп}$ отпущенной полоски металла – уменьшается. Следовательно, увеличение расхода охлаждающей жидкости должно уменьшать долю разупрочнённых зон в общей площади слоя наваренного металла.

Для удобства расчета в инженерной практике характеристик поверхностной твердости (ширины разупрочненных зон, глубины зоны закалки) с помощью аппроксимации результатов численных расчетов были получены аналитические зависимости. Аппроксимация основывалась на допущениях, принятых Хольмом Р. при описании электротепловых процессов в электрических контактах. При этом влияние поверхностного охлаждения детали учитывалось параметром ν , являющимся функцией коэффициента поверхностной теплоотдачи α , которая получена интерполяцией результатов численных расчетов:

$$\nu(\alpha) = (1 - 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot \alpha + 7,8 \cdot 10^{-11} \cdot \alpha^2). \quad (5)$$

Таким образом, основными факторами влияния на глубину закалки поверхностного слоя после ЭКНП являются сила I и длительность t_u импульса тока, а на ширину зон отпуска и степень разупрочнения в этих

зонах – ещё и скорость V наварки, длительность t_n пауз, расход Q охлаждающей воды.

Глава 3. Адекватность теоретических моделей проверялась экспериментальным исследованием влияния основных параметров режима ЭКНП на характеристики поверхностной твердости наваренного металла. При этом использовался аппарат теории планирования эксперимента.

Сначала исследовалось влияние параметров импульса тока (I , t_u) на глубину Z упрочнённого слоя, величина которой определялась по макрошлифам наваренных образцов. Диапазон варьирования факторов определялся, исходя из условия обеспечения качества соединения присадочной проволоки с основным металлом. В работах Дубровского В.А., Булычёва В.В., Зыбина И.Н. было показано, что решающим условием для получения такого соединения является частичное оплавление в зоне контакта проволока-деталь, которое достигается при определенной степени осадки проволоки. Эксперименты, проведенные совместно с Зыбиным И.Н., показали, что качественное соединение наваренного и основного металлов, то есть, соединение с наличием общих зерен гарантируется при степени осадки проволоки диаметром 1,6 – 1,8 мм в пределах 70 – 80 %.

На основании результатов эксперимента по влиянию параметров импульса тока (I , t_u) на глубину Z упрочнённого слоя было получено уравнение регрессии:

$$Z = -4,7 + 0,416I + 5,85t_u. \quad (6)$$

Расчет критерия Фишера показал адекватность полученной модели. Анализ результатов эксперимента показал, что наибольшее влияние на глубину упрочнения наваренной детали оказывает сила тока. С увеличением силы тока и времени действия импульса глубина зоны закалки увеличивается в выбранном диапазоне варьирования от 0,9 до 1,7 мм.

Сравнение результатов расчёта по уравнению регрессии (6) и результатов расчета максимальной глубины залегания изотермы начала аустенитного превращения, полученных по аналитическим выражениям (глава 2), а также численным методом, показывает, что максимальное расхождение между результатами не превышает 10 %. Это говорит о корректности изложенных в главе 2 допущений и об адекватности модели температурного поля, разработанной с учетом наличия джоулевых источников теплоты.

Проведённые металлографические исследования шлифов позволили определить диапазон параметров импульсов наварки, обеспечивающего образование соединения основного и присадочного металлов с наличием общих зерен. Кроме того, сходство формы реальной зоны закалки от единичной контактной площадки и формы изотерм, рассчитанных по модели в главе 2, свидетельствует о преобладающей роли джоулевых источников

теплоты при нагреве подповерхностных слоев основного металла. Полученные результаты позволяют назначать величину тока и длительность импульса при разработке технологического процесса восстановления поверхностей качения с применением ЭКНП.

С учётом параметров импульса наварки, гарантирующих качество соединения и требуемую глубину упрочнения, было также проведено исследование влияния скорости наварки, длительности паузы и расхода охлаждающей жидкости на ширину зон отпуска наваренного металла и на максимальное разупрочнение в этих зонах. Диапазон варьирования длительности пауз выбирался, исходя из условия обеспечения охлаждения электродов между импульсами, диапазон варьирования скорости наварки – исходя из допустимого перекрытия между контактными площадками, при котором степень осадки присадочной проволоки по длине валика составляет не менее 70 %. Диапазон варьирования расхода охлаждающей воды выбирался с учетом технических характеристик установки для электроконтактной наварки УЭН – 01. С целью исследования влияния расхода охлаждающей воды в более широком диапазоне установка УЭН-01 была оснащена приспособлением для дополнительного охлаждения, вода в которое поступала, минуя цикл охлаждения сварочного трансформатора. Согласно вышеизложенному были приняты следующие диапазоны варьирования факторов: для скорости V наварки – от 3 до 5 мм/с; для длительности t_n пауз – от 0,16 до 0,24 с; для расхода Q охлаждающей воды – от 0,00006 до 0,00018 м³/с.

На основании результатов эксперимента по влиянию указанных факторов (V , t_n , Q) на ширину $h_{отп}$ разупрочнённых зон поверхности слоя наваренного металла было получено уравнение регрессии:

$$h_p = 1,358 - 2,5 \cdot t_n - 1041,6 \cdot Q. \quad (7)$$

Адекватность полученной модели была подтверждена расчетом критерия Фишера. Анализ результатов данного экспериментального исследования показывает, что при условии обеспечения качества соединения между основным и наваренным металлом наибольшее влияние на ширину зон отпуска наваренного металла в исследованном диапазоне факторов оказывает длительность пауз, затем – расход охлаждающей воды. Скорость наварки существенно не влияет на ширину зон отпуска, что можно объяснить узким допустимым диапазоном варьирования этого фактора.

Таким образом, установлено, что с увеличением расхода охлаждающей воды и увеличением длительности пауз в пределах интервала варьирования можно уменьшить ширину разупрочнённых участков с 0,57 до 0,89 мм, то есть, почти в 1,6 раза.

Как показало исследование твердости поверхностного слоя образцов после ЭКНП по методу планирования эксперимента, её разброс по длине почти не зависит от изменения скорости наварки, длительности пауз и

расхода охлаждающей воды. Твердость колеблется в пределах от 47 до 63 HRC. Максимальное разупрочнение в зонах отпуска согласно статистической обработке экспериментальных данных в среднем составляет 8 HRC. Это говорит о том, что закалённая углеродистая сталь (65Г) успевает значительно разупрочниться даже от одного – двух циклов отпуска. По результатам эксперимента были уточнены коэффициенты для математической модели (4), полученной на основе параметра Холломоуна-Джейфа (глава 2) и описывающей снижение твёрдости в зонах отпуска. Так, например, для одного цикла отпуска $n = 1$, длительности импульса $t_n = 0,08$ с, скорости наварки $V = 4$ мм/с, длительности пауз $t_n = 0,2$ с расчетное максимальное снижение твердости в разупрочненных зонах соответствует экспериментальным данным с погрешностью не более 1 %, если коэффициенты принять равными: $K = 6,1$ и $C = 15$. Скорректированная таким образом модель может применяться в инженерной практике для прогнозирования максимальной степени разупрочнения зон отпуска.

На основе данных проведённых исследований были составлены рекомендации по выбору режимов, обеспечивающих уменьшение ширины зон отпуска на поверхности слоя наваренного металла.

Глава 4. Изменение режимов электроконтактной наварки не приводит к устранению структурной неоднородности слоя наваренного металла. Предварительные испытания контактной прочности слоя, полученного электроконтактной наваркой проволокой 65Г, показали, что выкрашивание и отслаивание покрытия в условиях трения качения наблюдается при нагрузке 1,4 кН уже через 10 ч, причем растрескивание наблюдается в местах перехода от закаленных зон к отпущенным. Для устранения вредного влияния структурной неоднородности на износостойкость в условиях трения качения использовалась дополнительная обкатка роликом.

Влияние обкатки роликами на усталостную прочность деталей после ЭКНП, наваренных низкоуглеродистой проволокой, рассматривалось в работах Емельянова В.А., Школьника Л.М. Однако исследование износостойкости и контактной прочности деталей, наваренных данным способом, в условиях трения качения до настоящего момента времени не проводилось. Государственным стандартом (ГОСТ 23.224 – 86) для проверки и выбора новой технологии восстановления предусматривается проведение сравнительных экспресс-испытаний на износостойкость. Для проведения таких испытаний использовался токарно-винторезный станок и сконструированное приспособление, имитирующее кинематический тип сопряжения карданного подшипника качения. Схема установки предусматривала ступенчатое изменение величины контактной нагрузки. С целью форсирования испытаний образцы изнашивались с нагрузкой, многократно превышающей величину контактной нагрузки, испытываемой

крестовинами в процессе эксплуатации. В ходе испытаний контактная нагрузка достигала величины 1,4 кН. Проведенные испытания показали, что с увеличением нагрузки сокращается время до появления следов разрушения поверхностного слоя образцов, то есть, уменьшается сопротивление изнашиванию.

Для качественного сравнения контактной прочности образцов, восстановленных с применением ППД, испытанию подвергались наваренные образцы без дополнительного упрочнения и наваренные образцы с последующей обкаткой роликом на различных режимах. Диаметр изнашиваемой поверхности образцов после шлифования составлял $33,65 \pm 0,012$ мм. Длина образца выбиралась, исходя из удобства его крепления в патроне токарного станка, и составляла 100 мм. В качестве основного металла была выбрана сталь 40Х, а в качестве присадочного – проволока из стали 65Г, обеспечивающая высокую твердость (47 – 63 HRC) после электроконтактной наварки. Образцы для исследования износостойкости наваривались на режимах, обеспечивающих согласно проведенным экспериментам как качество соединения основного и присадочного металлов, так и минимальную ширину разупрочненных зон слоя наваренного металла. После наварки образцы шлифовались “как чисто” и обкатывались торoidalным роликом с различным усилием его прижатия (табл. 1).

Как показал расчет поля касательных напряжений, возникающих при давлении ролика на деталь, наиболее опасными участками, где значение растягивающих касательных напряжений максимально, являются границы перехода закаленных структур к отпущенным. Расчет методом конечных элементов показал, что с увеличением ширины контакта ролик-деталь вдвое (от 1 до 2 мм) значение опасных касательных напряжений на границе перехода структур уменьшается с 4,3 – 5,2 МПа до 2,86 – 2,96 МПа при прочих равных параметрах. Исходя из результатов расчета, было принято решение об увеличении ширины профиля ролика при обкатке. Ширина профиля упрочняющего ролика выбиралась такой, чтобы ширина контакта ролика с обрабатываемой поверхностью превышала ширину разупрочненных зон наваренного металла. Установлено, что в отличие от обкатки роликом с радиусом профиля 1,25 мм и усилие прижатия 5 кН в случае обкатки роликом с радиусом профиля 2,5 мм на том же усилии растрескивание поверхностного слоя наваренного металла по границам переходных зон не наблюдается.

Обкатка роликом привела к повышению нижнего предела разброса поверхностной твердости наваренного металла на 4 – 5 HRC, что можно объяснить известным явлением: большей интенсивностью наклепа зон отпуска по сравнению с закаленными зонами.

Сравнительные испытания образцов после ЭКНП, а также образцов, дополнительно обкатанных после наварки роликом при разных усилиях его

прижатия, показали, что наилучшую контактную прочность имеют образцы № 2 и № 3 (табл. 1), обкатанные с усилиями 0,5 и 1 кН соответственно. Обкатка с малыми усилиями уменьшает высоту микронеровностей шлифованной поверхности слоя наваренного металла, что, как известно из работ Пинегина С.В., Корсакова В.С., Орлова А.В. положительно сказывается на контактной выносливости в условиях трения качения.

Таблица 1.

Параметры режима обкатки роликом при испытании на износостойкость

№ обр.	Усилие прижатия ролика, кН	Частота вращения об/мин	Продольная подача, мм/об	Кол-во проходов	Радиус профиля ролика, мм	Радиус ролика, мм
1	–	–	–	–	–	–
2	0,5	80	1,25	1	2,5	40
3	1	80	1,25	1	2,5	40
4	2	80	1,25	1	2,5	40
5	4	80	1,25	1	2,5	40

Обкатка роликом с большими усилиями прижатия приводит к получению более крупной высоты микронеровностей рельефа обработанной поверхности (табл. 2), что требует при восстановлении поверхностей качения последующей операции полирования. Кроме того, как показывают сравнительные испытания на износостойкость, поверхностные слои наваренного металла, имеющие после шлифования и обкатки роликом более крупный микрорельеф, более подвержены разрушению в условиях трения качения, чем поверхности, имеющие малую высоту микронеровностей (в пределах допуска шероховатости поверхностей качения). Разрушение поверхностного слоя, по-видимому, связано с увеличением контактных давлений за счет уменьшения общей площади опорной поверхности, и, как следствие, ростом касательных напряжений в местах перехода структур, что приводит к скорейшему исчерпанию запаса контактной выносливости в условиях трения качения. Установлено, что на образце №1 (табл. 2), подвергнутом отделочной обкатке роликом, после 14 ч испытаний с контактной нагрузкой 500 Н следов разрушения поверхностного слоя не обнаружено.

Таким образом, проведенные экспресс-испытания позволили установить, что поверхностные слои наваренного металла после обкатки с усилием прижатия ролика 0,5 – 1 кН, обладают более высоким запасом контактной прочности, чем слои наваренного металла без дополнительной обкатки. Кроме того, обкатка с такими усилиями прижатия ролика позволяет

получать шероховатость поверхности, удовлетворяющую требованиям технической документации на поверхности качения, и тем самым исключить полирование, часто используемое как окончательная обработка поверхностей качения.

Таблица 2.

Влияние обкатки роликом на шероховатость поверхности

№ обр.	Исходная шероховатость (после шлифования) R_a , мкм	Сила обкатки, Н	Шероховатость после обкатки роликом R_a , мкм
1	0,67 – 0,88	500	0,57 – 0,87
2	0,68 – 0,96	3000	1,8 – 2,1

Глава 5. На основании результатов проведённых исследований был разработан типовой технологический процесс восстановления поверхностей качения. Апробация технологии проводилась при восстановлении поверхностей качения крестовин карданного вала тягового двигателя электровозов серии ЧС. Кроме того, данная технология применялась для восстановления полукрестовин карданной передачи электропоездов метро и других деталей подвижного состава с поверхностями качения.

Указанная технология восстановления имеет следующие достоинства: экологическая безопасность, малая трудоемкость, возможность восстановления поверхностей с величиной износа от нескольких десятых долей до одного миллиметра и более, отсутствие термических деформаций деталей, отсутствие окончательного полирования поверхностей качения.

Технологический процесс восстановления деталей с поверхностями качения внедрен на предприятии НПП “Велд”. Годовой экономический эффект от внедрения разработанной технологии составил 361350 рублей для партии крестовин карданного вала тягового двигателя электровозов серии ЧС 286 штук.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Электроконтактная наварка проволокой оплавлением (ЭКНП) является технологией, позволяющей при минимальном тепловложении получать соединение основного и наваренного металлов с общими зёрнами. Однако слой наваренного металла обладает структурной неоднородностью, которая в условиях высоких контактных нагрузок при качении может приводить к его разрушению. Предварительные испытания образцов после ЭКНП ча износостойкость показали, что следы разрушения металла наблюдаются в зонах локального разупрочнения. Износостойкость наваренных слоев в условиях трения качения следует повышать за счет

управления структурой при помощи подбора режимов ЭКНП и последующего поверхностного пластического деформирования (ППД).

2. Разработана математическая модель формирования разупрочненных зон при ЭКНП. Основными факторами влияния на параметры поверхностной твердости слоя наваренного металла (ширину разупрочненных зон, снижение твердости в этих зонах, глубину закалки) являются параметры режима ЭКНП: сила, длительность импульсов тока, длительность пауз между импульсами, скорость наварки и расход охлаждающей воды. Установлено, что с уменьшением скорости наварки и длительности пауз неравномерность поверхностной твердости по длине навариваемой детали возрастает за счет увеличения циклов отпуска у боковых кромок валиков наваренного металла.

3. Проведены исследования влияния параметров режима наварки на параметры поверхностной твердости наваренного металла. Установлено, что с увеличением расхода охлаждающей воды ширина зон локального разупрочнения уменьшается, но глубина упрочнения наваренной детали не изменяется. Это связано с тем, что при удалении от поверхности вглубь навариваемой детали роль поверхностного охлаждения в распределении температур снижается и увеличивается влияние внутренних джоулевых источников теплоты. Выявлено, что в диапазоне значений, обеспечивающем соединение основного и наваренного металла с общими зернами, влияние скорости наварки на ширину разупрочненных зон незначительно.

4. Проведена проверка адекватности модели для расчета термического цикла с учетом влияния джоулевых источников теплоты. Совпадение формы расчетной изотермы, соответствующей температуре начала аустенитного превращения при нагреве, и формы границы реальной зоны закалки на макрошлифе наваренного образца (основной металл: 40Х, присадочная проволока: Св08Г2С, диаметр 1,6 мм) свидетельствует об адекватности модели.

5. Проведены исследования влияния обкатки роликом на твердость наваренного металла. Выявлено, что при повышении контактных напряжений в разупрочненных зонах наваренного металла начинают появляться следы разрушения поверхности. Это связано с увеличением растягивающих касательных напряжений, действующих в зонах перехода структур. Рекомендовано снижать величину растягивающих касательных напряжений за счет увеличения радиуса профиля ролика при обкатке. Радиус должен быть таким, чтобы ширина контакта ролика с обрабатываемой поверхностью превышала ширину разупрочненных зон наваренного металла.

6. Обкатка роликом после ЭКНП (марка проволоки – 65Г, диаметр проволоки – 1,8 мм) позволяет снизить неравномерность поверхностной твердости слоя наваренного металла на 4 – 5 HRC.

7. Проведенные сравнительные испытания образцов на износостойкости в условиях трения качения показали, что наибольшее

увеличение износостойкости (не менее 20 %) наблюдается у образцов, наваренных на оптимальных режимах и обкатанных с малыми усилиями прижатия, при которых реализуется процесс выглаживания поверхности.

8. Разработаны технологические рекомендации для восстановления поверхностей качения. Рекомендовано в качестве окончательной обработки поверхностей качения вместо полирования использовать обкатку с малым усилием прижатия ролика, после которой достигается шероховатость, меньшая, чем при чистовом шлифовании, что положительно влияет на контактную прочность в условиях трения качения.

9. Разработанная технология внедрена на НПП “Велд”. Годовой экономический эффект от внедрения технологии составил 361350 рублей для партии крестовин карданного вала электровозов серии ЧС 286 штук.

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:

1. Пономарев А.И., Дубровский В.А. Расчетная оценка неоднородности поверхностной твердости деталей машин после обработки импульсными локальными тепловыми источниками // 1-я Российская конференция молодых ученых по математическому моделированию: Тезисы докладов. – Москва, 2000. – С. 199 – 201.

2. Дубровский В.А., Булычев В.В., Пономарев А.И. Выбор методики расчета электрических полей в детали при электроконтактной наплавке // Прогрессивные технологии, конструкции и системы в приборо- и машиностроении: Тезисы докладов ВНТК. – Калуга, 2000. – С. 19.

3. Дубровский В.А., Зыбин И.Н., Пономарев А.И. Математическая модель осадки присадочной проволоки при электроконтактной наплавке // Тр. МГТУ. – 2002. - № 581. – С. 130-136.

4. Математическая модель формирования разупрочненных зон в электроконтактных покрытиях / В.А. Дубровский, В.В. Булычев, А.И. Пономарев, И.Н. Зыбин // Тр. МГТУ. – 2002. - № 581. – С. 137-144.

5. Дубровский В.А., Булычев В.В., Пономарев А.И. Влияние режима электроконтактной наварки на характеристики твердости наваренного слоя // Прогрессивные технологии, конструкции и системы в приборо- и машиностроении: Тезисы докладов ВНТК. – Калуга, 2002. – С. 45 – 46.

6. Пономарев А.И. Повышение износостойкости поверхностей качения, восстановленных электроконтактной наваркой проволокой // Прогрессивные технологии, конструкции и системы в приборо- и машиностроении: Тезисы докладов ВНТК. – Калуга, 2002. – С. 282.

7. Дубровский В.А., Булычев В.В., Пономарев А.И. Предотвращение выплесков при электроконтактной наварке проволокой из стали 40Х13 // Сварочное производство. – 2003. – № 6. – С. 12 – 15.

Пономарев Алексей Иванович

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ
ПОВЕРХНОСТЕЙ КАЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ
НАВАРКОЙ ПРОВОЛОКОЙ**

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

Подписано в печать 30.01.2004
Формат 60х84/16. Бумага офсетная. Печать трафаретная.
Усл. печ. л. 1,5. Тираж 100 экз. Зак № 25.

Отпечатано АП «Полиграфия», г. Калуга, ул. Тульская 13а.
Лиц. ПЛД № 42-29 от 23.12.99