

Белинин Дмитрий Сергеевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЛАЗМЕННОЙ
ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ
ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ**

05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре «Сварочное производство и технология конструкционных материалов» ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Щицын Юрий Дмитриевич

Официальные оппоненты: **Штенников Василий Сергеевич**
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВПО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова», профессор кафедры «Машины и технология обработки металлов давлением и сварочное производство»

Купцов Сергей Гаврилович
кандидат технических наук, доцент
ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», доцент кафедры «Литейное производство и упрочняющие технологии»

Ведущая организация: **ОАО Научно-производственное объединение «Искра», г. Пермь**

Защита состоится «23» декабря 2014 года в 14-00 на заседании диссертационного совета Д 212.285.10 при ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира 19, ауд. М - 323.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <http://dissovet.science.urfu.ru/news2/>

Автореферат разослан «30» октября 2014 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, профессор

Е.Ю.Раскатов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Однокатковая опорная часть мостовой конструкции является тяжело нагруженным элементом и работает в условиях высоких суммарных контактных нагрузок, резких перепадов температур и воздействия агрессивных сред. Конструкция достаточно массивная и габаритная, представляет собой каток, перемещающийся между поверхностями опорных плит. Как правило, тяжело нагруженные детали воспринимают основную нагрузку своими поверхностными слоями. Учитывая многолетний опыт изготовления и эксплуатации таких конструкций разработчиками установлено, что толщина рабочего слоя заданной конструкции составляет 4,5 мм, с распределением твердости 54 – 42 HRC от поверхности в глубь изделия. Условия эксплуатации предполагают использование материалов сочетающих в себе как высокие прочностные характеристики так и высокие характеристики коррозионной стойкости. Опыт разработки показывает, что с точки зрения технологических и экономических показателей, наиболее рациональным материалом для изготовления опорных пар является сталь 40X13.

Повышение износостойкости деталей, работающих в условиях высоких суммарных контактных нагрузок и воздействия агрессивных атмосфер за счет формирования структуры рабочего слоя с заданным комплексом свойств при плазменной поверхностной закалке и наплавке является актуальной проблемой. На сегодняшний день существуют технологические рекомендации плазменной поверхностной закалки применительно к валковым сталям и чугунам, и позволяющие получить упрочненный слой глубиной не более 2.5 мм. В большинстве случаев процессы наплавки и термообработки выполняются на токе прямой полярности, что не всегда обеспечивает необходимый комплекс свойств упрочненного слоя.

Таким образом, получение упрочненных слоев требуемых характеристик и расширение номенклатуры материалов подвергающихся поверхностному упрочнению является актуальной задачей, а задачи получения повышенной глубины упрочненного слоя с требуемыми характеристиками и вовсе остаются нерешенными.

Цель и задачи работы. Цель работы – формирование рабочих поверхностей деталей опорной конструкции из стали 40X13 с твердостью 52 – 42 HRC на глубину не менее 4 мм.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие **задачи**:

- Изучение закономерностей теплопередачи в изделие при плазменной поверхностной термообработке на токах прямой и обратной полярности с целью формирования упрочненных слоев глубиной в 4 мм.
- Изучение влияния плазменного поверхностного нагрева при работе на токах прямой и обратной полярности на особенности структурообразования в высоколегированных коррозионно-стойких сталях.
- Установление взаимосвязи технологических параметров плазменной поверхностной термообработки и наплавки на токе обратной полярности с глубиной и твердостью упрочненного слоя.
- Разработка универсального плазмотрона с блоком управления плазменной дугой, совмещенного с источником питания, для проведения плазменной наплавки и поверхностной термообработки.
- Внедрение результатов работы применительно к изготовлению однокатковой опорной части свободного конца мостовой конструкции.

Методология исследования включала аналитическое решение тепловых задач с последующей экспериментальной проверкой. В работе использован комплекс научно-технологического оборудования для плазменной обработки металлов на базе универсального станка УНП-500. Для исследования структуры и свойств изучаемых материалов использовались следующие методы: рентгено-фазовый анализ; методы

оптической и электронной микроскопии, стандартные методики исследования свойств материалов. Исследования проводились на образцах из стали 40X13.

Научная новизна работы:

На основе изучения особенностей теплопередачи в изделии при плазменной обработке на токах прямой и обратной полярности определены условия формирования упрочненных поверхностных слоев повышенной толщины изделий из высоколегированных сталей мартенситного класса:

1. Выявлено влияние полярности тока на геометрические параметры, структуру и твердость упрочненной зоны при плазменной поверхностной обработке высоколегированных коррозионностойких сталей мартенситного класса. Определены рациональные области применения плазменной поверхностной обработки на токах прямой и обратной полярности.
2. Определено соотношение количества теплоты вводимого в обрабатываемое изделие при работе плазматрона на токах прямой и обратной полярности между теплопередачей от плазменного потока и теплопередачей за счет приэлектродных процессов на поверхности изделия. Показана возможность регулирования теплопередачи в изделии при работе плазматрона на токе обратной полярности за счет изменения площади зоны блуждания катодных пятен (зоны катодной очистки).
3. Теоритически обоснована и экспериментально подтверждена возможность получения закаленного поверхностного слоя толщиной 4,5 мм изделий из стали 40X13 при плазменной поверхностной обработке на токе прямой полярности с оплавлением поверхности. Показана возможность получения повышенной толщины упрочненных слоев изделий из высоколегированных коррозионностойких сталей мартенситного класса плазменной наплавкой однородного материала на токах прямой и обратной полярности.
4. Разработана тепловая модель плазменной поверхностной обработки на токе обратной полярности, учитывающая нагрев рабочей поверхности изделия за счет плазменного потока и тепловыделения в катодных пятнах, решение которой обосновывает возможность получения упрочненного поверхностного слоя глубиной 2,5 мм изделий из стали 40X13 при обработке без оплавления поверхности. Показано, что образующаяся в результате обработки мелкодисперсная структура мартенситного типа, не требует дальнейшей термической и механической обработки.

Практическая значимость работы:

- Разработаны научно-обоснованные технологические рекомендации по реализации процесса плазменного поверхностного упрочнения и наплавки для получения повышенной глубины упрочненного слоя обрабатываемых изделий из стали 40X13. Разработаны технологические процессы плазменной наплавки и поверхностной термообработки на прямой и обратной полярности обеспечивающие различные сочетания геометрических и прочностных характеристик рабочих слоев однокатковых опорных частей из стали 40X13
- Разработано оборудование для проведения плазменной поверхностной термообработки и наплавки на токах прямой и обратной полярности.
- Осуществлено внедрение технологического процесса плазменной поверхностной термообработки при изготовлении однокатковой опорной части свободного конца мостовой конструкции.

На защиту выносятся:

- Определение количественного соотношения доли тепловложения в изделия при работе на обратной полярности;
- Методика расчета температурных полей при обработке на обратной полярности.
- Влияние параметров режима и полярности тока на структуру и свойства упрочненной зоны
- Технологические процессы плазменной наплавки и поверхностной термообработки и конструктивно-технологическое обеспечение для их реализации

- Рекомендации по использованию разработанных технологических процессов в промышленном производстве.

Работа выполнялась с 2010 по 2013 гг в рамках тематического плана по заданиям Минобразования России и НТП, финансируемого из средств федерального бюджета Рособразованиём (Минобразованиём России) 1.31.11 «Повышение эффективности обработки металлов с использованием плазменных технологий» (гос. регистрация № 01201257419, № 01201168144). Результаты работы используются в ООО «Альфатех» (г. Пермь) при изготовлении опорных частей мостов и путепроводов (акт № 1/12 10.10.2012).

Апробация работы. Основные результаты диссертационного исследования представлены на следующих конференциях и конкурсах: международная научно-техническая конференция «Сварка и контроль – 2013», г. Пермь 2013; VI Уральская научно-практическая конференция «Сварка. Реновация. Триботехника». г. Нижний Тагил, 2013; международная научно-практическая конференция «Инновационные технологии в машиностроении», г. Пермь 2012; всероссийская научная конференция «Наука. Технологии. Инновации», г. Новосибирск, 2012; всероссийская ежегодная научно-техническая конференция молодых специалистов НПО «Искра», г. Пермь, 2011; всероссийская научно-практическая конференция «Молодежный инновационный форум 2011 Приволжского Федерального округа», г. Ульяновск, 2011. За совокупность работ по разработке и реализации процессов плазменной поверхностной термообработки и наплавки автор награжден медалью, дипломом лауреата всероссийского конкурса «Инженер года» и свидетельством профессионального инженера России.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 33 работы, в том числе 6 работ в рецензируемых журналах рекомендованных ВАК и одна работа в международном журнале входящем в базу SCOPUS.

Структура и объем работы. Диссертационное исследование состоит из введения, четырех глав, выводов по работе, списка литературы. Диссертация изложена на 133 страницах, в том числе содержит 65 рисунков, 27 таблиц, список литературы включает 128 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведена общая характеристика диссертационного исследования, обоснована актуальность выбранной темы.

В первой главе описаны устройство и принцип работы однокатковых опорных частей мостовой конструкций, кратко рассмотрены современные технологии получения их контактных поверхностей. Проанализированы проблемы термообработки стали 40X13. Выполнен анализ современных способов поверхностного упрочнения материалов, описаны достоинства и недостатки каждого из них. К недостаткам существующих способов поверхностного упрочнения относятся: высокая стоимость оборудования, его узкая специализация относительно применяемых материалов и полученных характеристик кроме того, оборудование занимает большие производственные площади. Показано, что одно из наиболее развивающихся и перспективных направлений упрочнения поверхности – это применение плазменных технологий, которые используются в процессах плазменной наплавки и поверхностной термообработки. Плазменные технологии характеризуются такими параметрами, как высокая температура плазменной дуги, возможность применения к любым материалам, возможность проведения комплексной обработки материалов одним инструментом без дополнительных операций.

На базе анализа научно-технической информации сформулированы основные требования к способам и оборудованию для плазменной наплавки и поверхностной термообработки: возможность получения упрочненных слоев заданных характеристик; использование малогабаритного оборудования; получение наплавленных и упрочненных слоев на одном и том же оборудовании.

На основе проведенного анализа сформулированы цель и задачи работы.

Методологической основой диссертации в области поверхностного упрочнения послужили научные работы Л.К. Лещинского, С.С. Самотугина, Е.Н. Сафонова, В.Н.

Короткова, А.Е. Балановского и др.; в области плазменных технологий – научные труды А.В. Донского, А.В. Николаева, В.С. Клубникина, Б.О. Христофиса, А.Ф. Пузрякова и др.

Вторая глава посвящена анализу тепловой обстановки на поверхности изделия при плазменной поверхностной термообработке на токах прямой и обратной полярности и практической оценке теплопередачи в изделие.

В главе выполнен краткий анализ тепловых процессов при плазменном поверхностном нагреве.

Основной физической характеристикой плазменного упрочнения является температурное поле, значение которого дает возможность оценить температуру в разных точках зоны термического воздействия, скорость нагрева и охлаждения, а в конечном итоге структурное состояние и фазовый состав поверхностного слоя материала.

Поскольку особенности формирующихся в результате поверхностной закалки структуры и свойств определяются характером термического цикла обработки, информация о тепловом состоянии позволяет определить глубину и ширину зоны термического влияния, характер и степень завершенности фазовых превращений, прогнозировать конечную структуру и свойства упрочняемого слоя. Оценивать набор этих характеристик, необходимых для практической реализации процесса закалки в производственных условиях, а также направление и степень влияния на них параметров режима обработки рационально с использованием математической модели нагрева-охлаждения поверхности детали концентрированным источником тепла.

При этом описание температурных полей, возникающих при поверхностной термообработке концентрированными источниками энергии, осуществляется на основе решения дифференциального уравнения теплопроводности, отражающего условия теплопередачи в твердых телах.

В общем случае для полубесконечного тела в прямоугольной системе координат имеет вид:

$$\left(\frac{\delta y}{\delta x}\right)(c\gamma T) = \text{div}(\lambda \text{grad}T) + q \quad (1)$$

где:

c – удельная теплоемкость материала; γ – плотность материала; λ – коэффициент теплопроводности; q – удельное количество теплоты выделяемое источником нагрева.

Одним из современных направлений построения тепловых моделей при является использование метода функции Грина. Для некоторых сварочных процессов функции Грина уже найдены и систематизированы. Проведя необходимую корректировку, их можно использовать и для процесса поверхностной термообработки..

Учитывая значительные габариты и массу обрабатываемых плит и катков, исследовали задачу нагрева полубесконечного тела в трёхмерной системе координат, движущимся с постоянной скоростью V , в положительном направлении оси x , поверхностным, непрерывно действующим, точечным источником тепла.

При аналитическом описании процессов распространения тепла в условиях поверхностной обработки плазменной дугой на токах прямой и обратной полярности приняли следующие допущения: учитывая значительные габариты и массу обрабатываемых изделий рассматривали распространение тепла в полубесконечном теле; поскольку при локальном нагреве массивного тела до температуры, не превышающей 1500 °С, потери тепла в окружающую среду составляют около 1 %, теплоотдачу с поверхности не учитывали; теплофизические свойства считали не зависящими от температуры; приняв во внимание, что вклад скрытой теплоты фазовых переходов в изменение удельной энтальпии железа при нагреве в исследуемом интервале температур не превышает 5 % , её в расчете не учитывали.

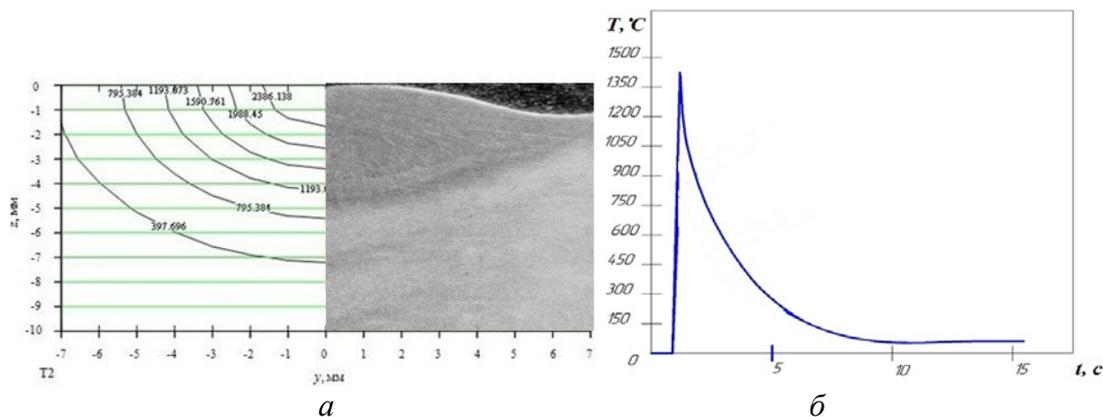


Рисунок 1 - Температурное поле(а) и термический цикл(б) плазменной поверхностной обработки на токе прямой полярности

По приведённым температурным полям (Рисунок 1) можно сделать вывод, что используемые для их построения параметры режима на токе прямой полярности требованиям к геометрии упрочненного слоя удовлетворяют, а значит, могут быть использованы для проведения опытных исследований.

Совместив результаты полученной модели с диаграммой состояния Fe – Cr и термокинетическими кривыми, можно сделать вывод, что при обработке на токе прямой полярности с оплавлением поверхности упрочнённый слой будет состоять из трёх зон: зоны закалки из жидкой фазы ($T > 1539^{\circ}\text{C}$), зоны закалки из твёрдой фазы ($1539^{\circ}\text{C} < T < 910^{\circ}\text{C}$) и зоны термовлияния ($T < 910^{\circ}\text{C}$). По положению изотерм оценили также геометрические характеристики упрочненного слоя

Отсюда следует вывод, что используемые для их построения параметры режима на токе прямой полярности требованиям к глубине закалённого слоя в 4.5 мм удовлетворяют, а значит, могут быть использованы для проведения опытных исследований, однако предлагаемая модель не учитывает влияние полярности. В отличие от плазменной дуги прямой полярности, плазменная дуга обратной полярности характеризуется более равномерным распределением тепловой мощности по поверхности изделия, и по мнению ряда ученых менее эффективна. Однако проведение дальнейших исследований по сравнению теплопередачи в изделие при работе на токах прямой и обратной полярности заставило усомниться в истинности таких предположений относительно обратной полярности.

Вопросам тепловложения в изделие при плазменной сварке, особенно при работе плазматрона на прямой полярности, посвящено достаточное количество работ. Выявлены основные факторы, влияющие на эффективный КПД процесса η_u . При совпадении качественной оценки влияния параметров режима на η_u результаты различных исследователей имеют значительное расхождение в количественных показателях. Это объясняется различием конструкций плазматронов, условий проведения исследований (диапазон мощности плазменной дуги, степень обжаривания, технологические особенности и др.), разнообразием методик, оборудования и регистрирующих приборов для определения тепловложения в обрабатываемый материал.

Оценка общей теплопередачи в изделие проводилась методом калориметрирования. Калориметрированием определяется экспериментально эффективная тепловая мощность сжатой дуги, измеряя энергию, введенную в изделие или так называемый имитатор изделия. Для измерения энергетических характеристик сжатой дуги на установке имеется измерительная станция из трех вольтметров и одного амперметра. Падение напряжений измерялось на сжатой дуге и ее участках (электрод - сопло, сопло – изделие и электрод – изделие).

Для измерения температуры на входе и выходе каждого элемента на установке имеется измерительная станция, состоящая из трех водяных ротаметров и четырех ртутных термометров (один на входе системы охлаждения и три на выходе). Термометры на выходе системы охлаждения расположены в непосредственной близости от плазматрона и изделия для уменьшения погрешности, вызванной теплоотдачей в

окружающую среду. Водяные ротаметры подсоединены на выходе системы охлаждения сразу после термометров, далее вода направляется в слив.

Целью эксперимента являлось получение данных о зависимости тепловложения в изделие от параметров процесса при работе плазмотрона на прямой и обратной полярности. В качестве основных факторов были выбраны технологические параметры – I_0 – сила тока, Q_n – расход плазмообразующего газа и геометрические параметры – d_c – диаметр сопла и $h_{эс}$ – расстояние от электрода до сопла.

По результатам выполненных исследований установлено, что при одинаковом токе и прочих равных условиях тепловложение в изделие выше при работе плазмотрона на обратной полярности, чем на прямой, вследствие большего напряжения дуги, при этом с уменьшением диаметра сопла d_c эта разница растет $P_{u\text{ on}} \approx (1,1 - 1,6) P_{u\text{ nn}}$. Расход плазмообразующего газа увеличивает тепловложение в изделие, при этом Q_n на прямой полярности оказывает большее влияние при большем диаметре плазмообразующего сопла d_c , а при меньшем диаметре влияние больше на обратной полярности. Проанализировав полученные результаты и изучив полученные зависимости можно сделать следующие выводы: увеличение силы тока приводит к повышению мощности сжатой дуги на всех её участках, а значит и к повышению тепловложения в плазмотрон и изделие; при прочих равных условиях при работе плазмотрона на токе обратной полярности тепловложение в изделие в 1,2 – 1,5 раза выше чем на прямой, что подтверждает целесообразность дальнейших исследований плазменной термообработки на токе обратной полярности

В третьей главе приводятся результаты исследования особенностей теплопередачи в изделие при работе плазмотрона на токе обратной полярности за счет плазменного потока и тепловыделения в активных катодных пятнах на поверхности изделия, и сделана попытка уточнения тепловой модели плазменной поверхностной термообработки на токе обратной полярности с учетом двух механизмов нагрева.

В отличие от плазменной дуги прямой полярности, плазменная дуга обратной полярности характеризуется более равномерным распределением тепловой мощности по поверхности изделия. Достигается это следующим образом: при работе плазмотрона в режиме дуги прямого действия обратной полярности обрабатываемое изделие является холодным катодом а дуга относится к типу дуг с нестационарными пятнами. Такие катодные пятна возникают как правило на холодных катодах - катодах из материалов с низкой температурой плавления и высокой теплопроводностью, а также на тугоплавких катодах в начальный период горения разряда. Одной из отличительных особенностей нестационарных пятен является кратковременность их существования и большая плотность тока в них ($j \sim 10^5 - 10^6 \text{ Асм}^{-2}$). Последнее означает, что удельные тепловые потоки достигают значений ($q \sim 10^6 - 10^7 \text{ Вт/см}^2$), таким образом достигаются необходимые для поверхностной закалки скорости нагрева и охлаждения.

Мощность сжатой дуги P_0 определяется технологическими параметрами процесса: током дуги I_d , напряжением U_d , составом и расходом плазмообразующего газа G_n , способом подачи плазмообразующего газа, расстоянием от электрода до изделия $h_{эи}$, полярностью, а также геометрическими параметрами плазмотрона: диаметром плазмообразующего сопла d_c , высотой канала сопла h_c , расстоянием от конца электрода до плазмообразующего сопла $r_{эс}$, размерами и формой плазмообразующей камеры.

Тепловложение в электрод плазмотрона и изделие определяется приэлектродными процессами и теплопередачей от сжатой дуги. Процессы, происходящие на электродах и в приэлектродных областях, сложны и до сих пор недостаточно изучены.

При работе на прямой полярности в качестве катода плазмотрона использовался вольфрамовый пруток $d_0 = 3 \text{ мм}$ (Рисунок 2, схемы 1,2), установленный в водоохлаждаемый электрододержатель и вольфрамовый пруток того же диаметра, глухо заделанный в медную водоохлаждаемую оправку (Рисунок 2, схемы 5 - 8). При работе на обратной полярности водоохлаждаемый анод плазмотрона был медным и медным с глухо заделанным вольфрамовым прутком (Рисунок 2, схемы 3,4). В качестве изделия использовался водоохлаждаемый медный имитатор и медный имитатор с глухой заделкой вольфрамового прутка (Рисунок 2).

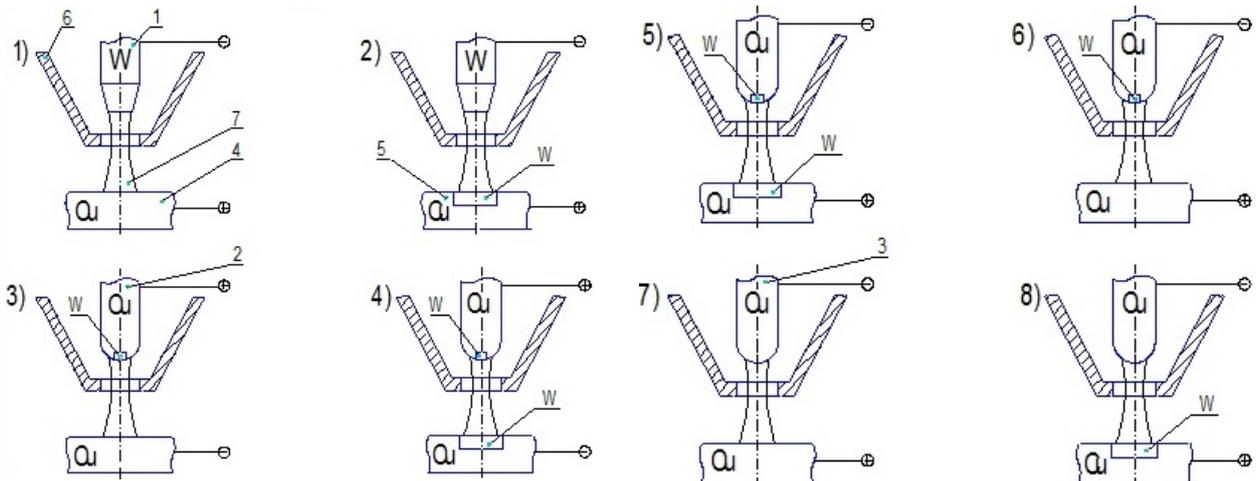
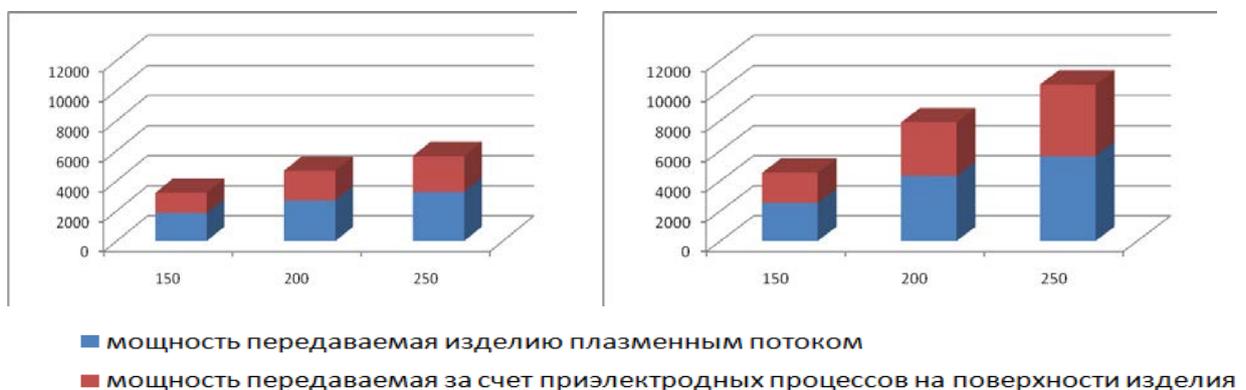


Рисунок 2 - Комбинация схем проведения экспериментов: 1 – вольфрамовый катод; 2 – медный анод с вольфрамовой вставкой; 3 – медный катод; 4 – медный имитатор изделия; 5 – медный имитатор изделия с вольфрамовой вставкой; 6 – плазмообразующее сопло; 7 – сжатая дуга

В процессе исследований I_d изменялся в пределах 50-300 А, $d_c = 3-6$ мм, $G_n = 2-5$ л/мин, $h_{эи} = 5-10$ мм. Структура столба сжатой дуги оценивалась по падению напряжений: U_d - на дуге (электрод- изделие), $U_{эс}$ -внутри плазматрона (электрод - сопло), $U_{си}$ - на внешнем участке дуги (сопло - изделие). Тепловложение в элементы плазматрона и изделие определялось калориметрированием. Получен большой массив экспериментальных данных, и его полное представление не представляется целесообразным.



а

б

Рисунок 3 - Тепловложение в изделие различными механизмами при работе плазматрона на токах прямой(а) и обратной(б) полярности при диаметре плазмообразующего сопла, $d_c = 4$ мм, и расходе плазмообразующего газа $G_n = 4,7$ л/мин)

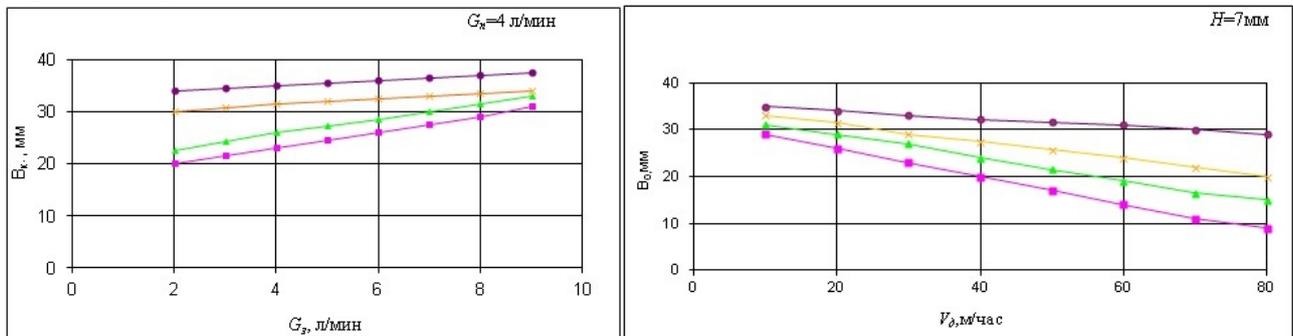
Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что тепловая мощность, передаваемая изделию плазменным потоком, составляет 55 – 85% всей мощности передаваемой изделию сжатой дугой (Рисунок 3). Причем при одинаковых режимах, при работе плазматрона на обратной полярности, величина P_n в 1,2 – 1,6 раз больше чем при работе на прямой полярности. Величиной P_n можно активно управлять изменяя параметры режима I_d , d_c , G_n . Таким образом, при работе плазматрона на обратной полярности, можно активно управлять эффективностью процесса, изменяя параметры режима.

При работе плазматрона на обратной полярности зона контакта дуги представляет собой совокупность достаточно большого числа относительно малых по размеру, но разрозненных нестационарных пятен с плотностью мощности в них порядка 10^{11}

Вт/мм², при этом высокую температуру имеет только та часть поверхности, на которую опираются пятна дуги, а остальная часть остается относительно холодной. Катодные пятна не привязаны к одному месту, они блуждают по всей поверхности, поэтому вызывают интерес тепловые процессы происходящие при действии комбинированного источника теплоты. Учитывая быстрое и хаотичное движение катодных пятен, кратковременность их существования, при допущении равномерного распределения вероятности возникновения катодного пятна в пределах зоны контакта дуги с металлом, совокупное действия катодных пятен можно при моделировании заменить распределенным поверхностным источником тепла. Тепло передаваемое плазменным потоком можно представить в виде поверхностного источника нагрева с нормальным распределением теплового потока в пятне нагрева радиусом r .

Для начала определяли влияние параметров режима на блуждание пятен. На этом этапе контрольным параметром являлась ширина зоны блуждания катодных пятен B_0 .

Установлено (Рисунок 4), что решающее влияние на ширину зоны катодной очистки оказывают: сварочный ток, $I_{св}$, расход защитного газа, G_3 , л/мин, скорость перемещения плазматрона, V_0 , м/час. Увеличение $I_{св}$ и G_3 и уменьшение V_0 расширяют зону блуждания пятен, причем, рост происходит до определенного предела ($B_0 = 1,5 D_3$), где D_3 диаметр защитного сопла плазматрона. Значительное увеличение $I_{св}$ или уменьшение V_0 приводит к подплавлению поверхности образцов и соответственно к привязке дуги.



а
 б
 ■ - открытая дуга $I_{св}=100$ А; ▲ - открытая дуга $I_{св}=150$ А; ★ - закрытая дуга 100 А; ● - закрытая $I_{св}=150$ А

Рисунок 4 - Влияние расхода защитного газа при $V_0 = 16$ м/ч (а) и скорости перемещения плазматрона при $G_3 = 4$ л/мин (б) на ширину зоны блуждания катодных пятен.

Стоит отметить что использование закрытой дуги (Рисунок 5), вследствие полного заполнения камеры аргоном, позволяет достичь размеров ширины зоны более чем $1,5 D_3$ и ограничивается геометрическими размерами камеры.

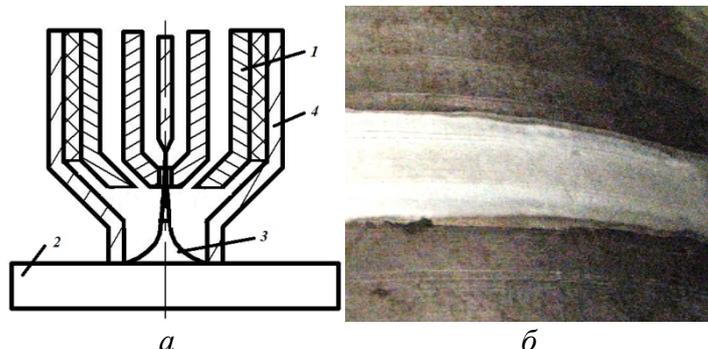


Рисунок 5 - Схема закрытой дуги (а) и вид поверхности после обработки (б).
 1 – плазматрон; 2 – изделие; 3 – плазменная дуга; 4 – медный водоохлаждаемый концевик.

Математическая модель основана на решении дифференциального уравнения теплопроводности. Дифференциальное уравнение теплопроводности является частным случаем уравнения переноса энергии и связывает температуру, координаты и время в дифференциальной форме.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + V \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{Q}{c\rho} \quad (2)$$

где: Q – эффективная тепловая мощность дуги Вт; V – скорость обработки м/ч; a – коэффициент температуропроводности м²/с; c – удельная теплоемкость Дж/кг*К; ρ – плотность материала кг/м³

Как было отмечено ранее, теплопередача в изделие при работе плазмотрона на обратной полярности определяется приэлектродными процессами и передачей тепла плазменным потоком, и мощность результирующего теплового источника может быть представлена в виде:

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad (3)$$

где: $Q_1 = k_1 \cdot Q_u$ – мощность, передающая совокупное тепловое воздействие катодных пятен; $Q_2 = k_2 \cdot Q_u$ – мощность источника тепла, передаваемого плазменным потоком; k_1, k_2 – коэффициенты учитывающие распределение мощности между потоком плазмы и катодными пятнами ($k_1 + k_2 = 1$); Q_u – общая мощность вводимая в изделие плазменной дугой обратной полярности.

Геометрия задачи представлена на рисунке 6.

Использовались граничные условия смешанного типа.

На границе 1 (Рисунок 6) условия первого рода равны $T=293$ К. На остальных поверхностях задавались граничные условия второго рода. На поверхности 2 величина удельного теплового потока:

$$q = q_1 + q_2, \quad (4)$$

где: $q_1 = Q_1/f$ – удельная мощность, передаваемая за счет катодных пятен Вт/м² (f – площадь блуждания катодных пятен, м²), q_2 – мощность передаваемая потоком плазмы, Вт/м².

На рисунках 7 – 8 представлены результаты решения задачи теплопроводности в программном комплексе COMSOL Multiphysics для стали 40X13:

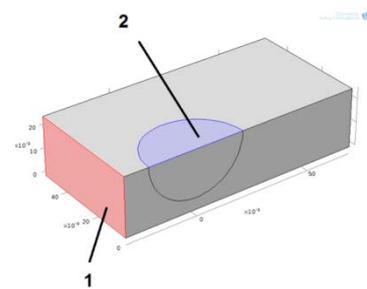


Рисунок 6 - Геометрия задачи.

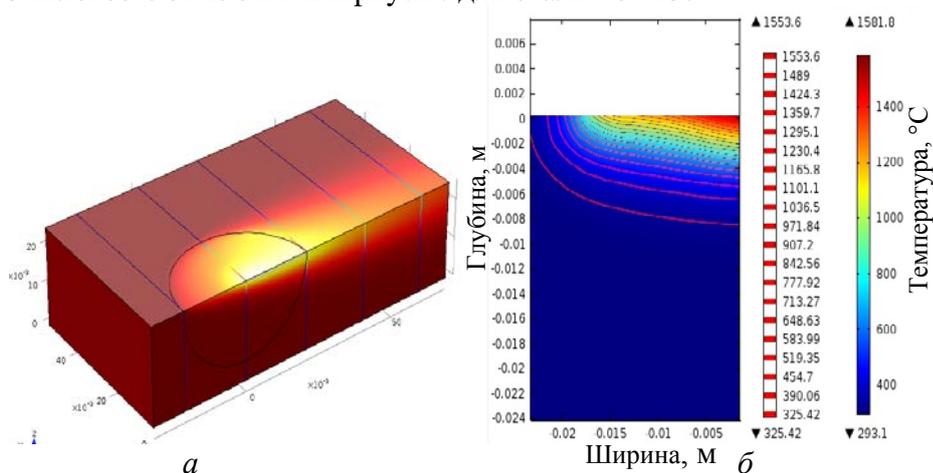


Рисунок 7 - Температурное поле на поверхности(а) и по сечению образца(б) из стали 40X13 ($I_D=200$ А;

$V_{пер} = 12.5$ м/ч; $d_c = 5$ мм).

Полученные после корректировки температурные поля (Рисунок 7) а также термоцикл (Рисунок 8) нагрева и охлаждения, показывают эффективность обработки плазменной дугой обратной полярности.

Таким образом использование обратной полярности позволяет при схожих параметрах режима достичь большей ширины упрочненного слоя без применения специальных сканирующих механизмов. За счет большего тепловложения в изделие обеспечивается благоприятный термический цикл для проведения плазменной поверхностной термообработки при меньшей общей мощности плазменной дуги.

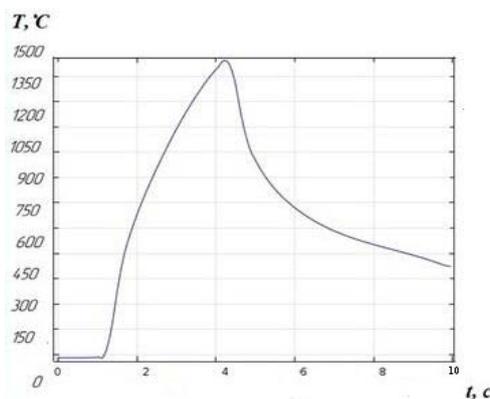


Рисунок 8 - Термический цикл нагрева – охлаждения поверхности при действии комбинированного источника теплоты

В четвертой главе проводится исследование особенностей плазменной наплавки и поверхностной термообработки изделий из стали 40X13 на токах прямой и обратной полярности. Описаны проблемы термообработки стали 40X13, получено экспериментальное подтверждение теоретических результатов. Описано влияние полярности на структуру и свойства упрочненной зоны. Проведено исследование механических свойств упрочненных слоев, описаны схема технологического процесса плазменного упрочнения и оборудование для проведения плазменной поверхностной термообработки и наплавки, приведен технико-экономический расчет предлагаемой технологии.

Варианты обработки с оплавлением поверхности обычно применяются для получения больших глубин упрочненного слоя: для обработки на токе прямой полярности с оплавлением поверхности: ширина закаленной дорожки за один проход составила 12 мм, глубина упрочненной зоны - 4,35мм. Структура основного материала – сорбит отпуска. Структура зоны оплавления (Рисунок 9, участок 1) представляет собой мартенсит с выделениями карбидной фазы по осям дендритов.

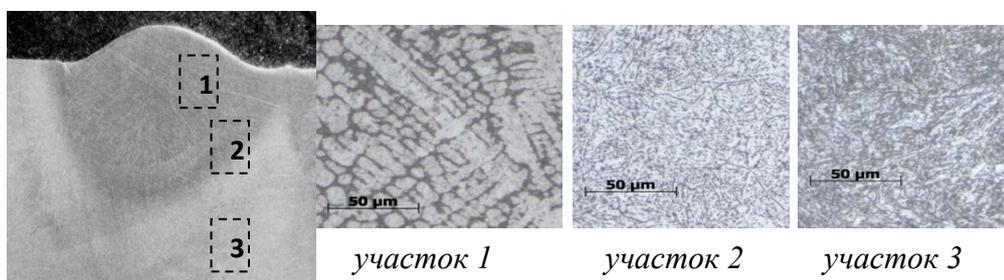


Рисунок 9 - Микроструктура образца с оплавлением поверхности.

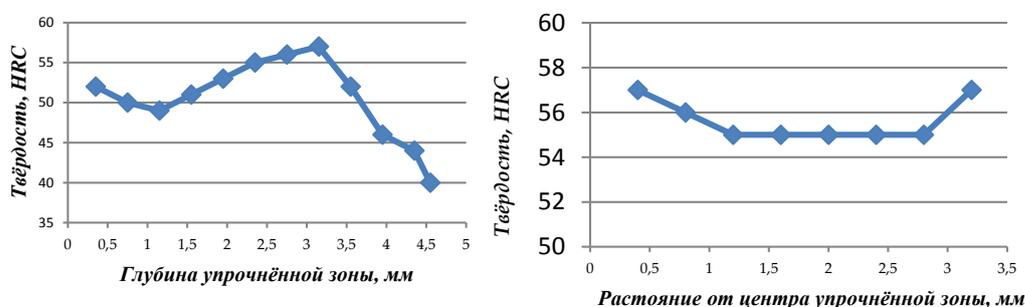


Рисунок 10 - Распределение твердости по глубине и ширине упрочненной зоны.

В зоне закалки из твердой фазы (Рисунок 9, участок 2) наблюдается спектр структур – от структуры мартенситного типа на границе с зоной оплавления с переходом к структуре мартенситного типа с выделениями карбидов (как в теле зерна, так и по границам зёрен).

В переходной зоне (Рисунок 9, участок 3) – структура имеет вид феррито-карбидной смеси сорбитного типа различной дисперсности. Такое распределение микроструктур по зонам характерно для традиционной закалки изделий из стали 40X13 на максимальную твердость с сохранением свойств коррозионной стойкости.

При обработке без оплавления поверхности на токе обратной полярности получаем равномерный упрочненный слой глубиной 2.5 мм и шириной в 20 – 25 мм со структурой мелкодисперсного мартенсита (Рисунок 11).

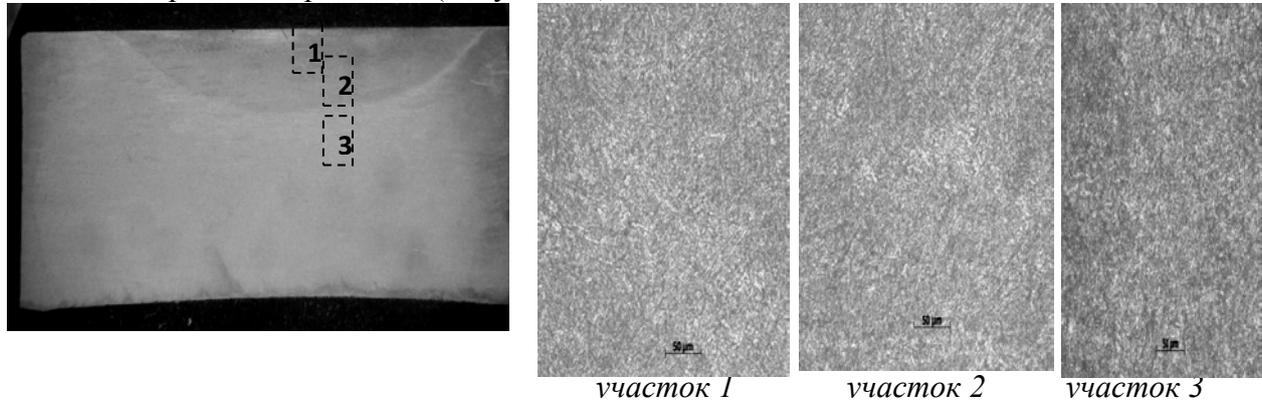


Рисунок 11 - Микроструктура образца обработанного без оплавления поверхности на токе обратной полярности.

При обработке на обратной полярности на малых токах удалось получить упрочненный слой глубиной 0.5 мм без видимых следов воздействия на поверхность и со структурой мартенсита (Рисунок 13).

При таком варианте обработки получаем резкое изменение структуры и свойств тонкого поверхностного слоя с минимальным нагревом изделия.

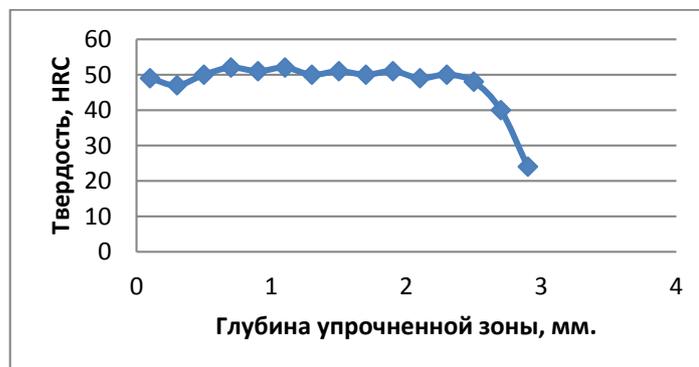


Рисунок 12 - Распределение твердости по глубине упрочненной зоны.

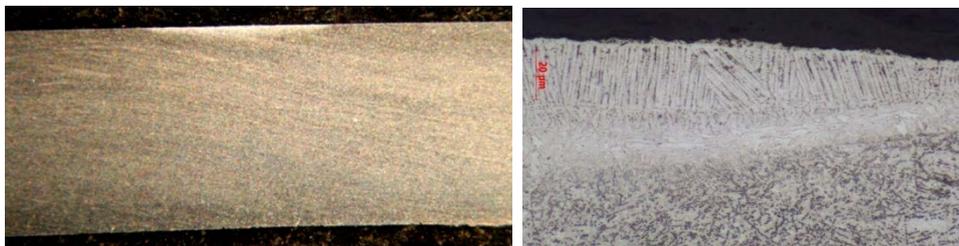


Рисунок 13 - Микроструктура образца обработанного без оплавления поверхности на токе обратной полярности на малых токах.

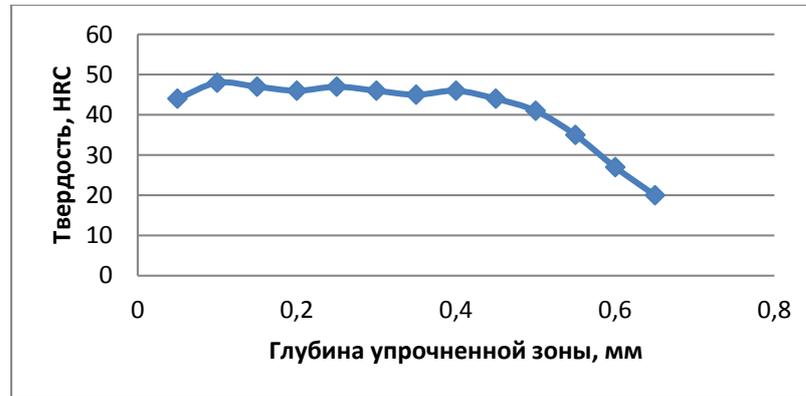


Рисунок 14 - Распределение твердости по глубине упрочненной зоны образца обработанного без оплавления поверхности на токе обратной полярности на малых токах.

Испытания образцов на износостойкость и усталость показали что наилучшими показателями по результатам испытаний на износостойкость обладают варианты закалки на прямой полярности с оплавлением поверхности, по результатам испытаний на ударную вязкость наилучший результат при обработке на обратной полярности без оплавления поверхности.

Таким образом обработка на токе прямой полярности с оплавлением поверхности рекомендована для получения упрочненного слоя глубиной 4.35 мм со значением твердости не ниже 42 HRC (Рисунок 10) при производстве ОКОЧ мостовой конструкции из стали 40X13. Применение обратной полярности целесообразно для получения упрочненных слоев достаточно широкого диапазона геометрических и прочностных характеристик (Рисунки 12,14) и плазменной наплавки с целью получения большой ширины наплавленных валиков и снижения доли участия основного металла в наплавленном. Кроме того при обработке на токе обратной полярности без плавления поверхности удастся получить структуру упрочненного слоя не требующую дальнейшей обработки, ни термической ни механической.

Как было отмечено ранее, получение упрочненного слоя требуемых характеристик возможно и с помощью наплавки однородного материала, причем, как видно из результатов, геометрические характеристики упрочненного слоя можно регулировать в достаточно широких пределах. Помимо наплавленного материала высокой твердости, за счет плазменного нагрева меняется структура и свойства основного материала. В зависимости от полярности глубина проплавления основного металла варьируется от десятых долей (при работе на токе обратной полярности) до нескольких миллиметров (при работе на токе прямой полярности). Однако повышение глубины проплавления основного металла ведет к перегреву всего обрабатываемого изделия и соответственно к появлению дефектов как геометрических, так и структурных. Применение плазменной наплавки на токе прямой полярности позволяет повысить суммарную величину упрочненного слоя, однако есть риск перегрева изделия и возникновения деформаций и дефектов. Плазменная наплавка на токе обратной полярности позволяет снизить долю участия основного металла и увеличить ширину наплавленного слоя за один проход. Большая ширина наплавки за один проход позволяет увеличить производительность процесса и снизить риск перегрева изделия без потери качества упрочняемого слоя.

Технологический процесс плазменной поверхностной термической обработки основан на быстром нагреве рабочих поверхностей обрабатываемых с последующим быстрым охлаждением за счет теплоотвода в глубинные слои материала изделия.

Сущность технологического процесса заключается в следующем: между электродом и обрабатываемой поверхностью детали посредством высокочастотного разряда возбуждается дуга прямой полярности; для формирования сжатой дуги защиты и расплавленного металла от взаимодействия с воздухом в камеру плазматрона подается аргон; регулирование термического цикла в поверхностном слое детали осуществляется

путем изменения мощности сжатой дуги и скорости перемещения плазмотрона относительно изделия; упрочнение поверхности заданной площади достигается последовательным формированием зон закалки в виде протяженных полос в стык по прямой или винтовой линии в зависимости от конфигурации детали.

В качестве рабочего инструмента используется разработанный универсальный плазмотрон и блок управления плазменной дугой совмещенный с источником питания.

На сегодняшний день основной технологией получения рабочих контактных поверхностей ОКОЧ является наплавка высокопрочных сталей, обеспечивающих высокие значения твердости и имеющих достаточную стойкость против атмосферной коррозии, на более дешевую сердцевину.

Учитывая высокую стоимость таких групп наплавочных материалов и их склонность к термическому упрочнению, целесообразно в случае небольшой толщины рабочих слоев контактных поверхностей ОКОЧ изготавливать плиты и катки из высоколегированных коррозионностойких сталей и подвергать их поверхности термическому упрочнению. Таким образом обеспечиваются высокие значения твердости контактных поверхностей и стойкость против коррозии. В нашем случае первоначальной технологией изготовления однокатковой опорной части являлась наплавка рабочего слоя контактных поверхностей из стали 40X13 на сердцевину катков и опорных вставок из стали 09Г2С. Предлагаемой технологией является плазменная поверхностная термообработка контактных поверхностей катков и опорных вставок целиком изготовленных из стали 40X13 с сохранением первоначальных свойств в массиве деталей. Исходя из проведенного сравнения, применение технологии плазменного поверхностного упрочнения позволяет снизить почти на 30% затраты на изготовление деталей однокатковой опорной части мостовой конструкции. При этом использование в качестве материала детали стали 40X13 обеспечивает лучшее сочетание прочностных и свойств коррозионной стойкости в массиве деталей по сравнению с использовавшейся, в качестве сердцевины деталей ОКОЧ стали 09Г2С, а также сократить количество ремонтных съёмов ОКОЧ до 3х раз.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ:

1. Определено влияние технологических параметров процесса плазменного упрочнения на мощность сжатой дуги и теплопередачу в изделие при работе на токах прямой и обратной полярности. Установлено что при схожих технологических параметрах, тепловложение в изделие при работе плазмотрона на токе обратной полярности в 1,3 – 1,6 раза выше чем при работе на прямой.
2. Определено различие теплопередачи в изделие за счет процессов в приэлектродных областях при работе плазмотрона на токах прямой и обратной полярности. Установлено количественное соотношение тепловой мощности, передаваемой изделию плазменным потоком и за счет приэлектродных процессов на поверхности изделия. Показано, что мощность передаваемая изделию плазменным потоком при работе на токах прямой и обратной полярности составляет 65 – 85% всей мощности передаваемой изделию сжатой дугой. При работе плазмотрона на токе обратной полярности, при одинаковых режимах, величина мощности передаваемой потоком плазмы в 1,2 – 1,6 раз больше чем при работе на прямой полярности.
3. Разработана тепловая модель плазменной поверхностной термообработки на токе обратной полярности, учитывающая два механизма нагрева изделия: от потока плазмы и за счет тепловыделения в нестационарных катодных пятнах.
4. Определены геометрические характеристики и структурные составляющие основных зон формируемых в сталях рассматриваемой группы при плазменной поверхностной термообработке:
 - в результате плазменной поверхностной закалки на токе прямой полярности с оплавлением поверхности удается получить упрочненные слои шириной от 7 до 12 мм и глубиной от 2 до 4,5 мм в зависимости от погонной энергии режима. При этом формируется литая структура мартенситного типа с постепенным переходом к мелкодисперсной структуре основы, с равномерно распределенными по сечению

значениями твердости (56 – 42 HRC от поверхности вглубь изделия). При термической обработке с оплавлением поверхности необходимо использование низкотемпературного отпуска для снятия закалочных напряжений.

- при обработке без оплавления поверхности на токе обратной полярности удается получить упрочненный слой с равномерно распределенными по глубине (от 0,5 до 2,5 мм) и ширине (от 15 до 23 мм) прочностными свойствами и благоприятной мелкозернистой структурой высокой твердости (до 50 HRC) не требующей дальнейшей термической и механической обработки. Поверхностная обработка на токе обратной полярности при малых погонных энергиях обеспечивает резкое изменение структуры и свойств тонкого поверхностного слоя (до 0,5 мм) с минимальным нагревом изделия. При этом, за счет высокоскоростного нагрева и охлаждения поверхности небольшой глубины образуется ориентированная мелкодисперсная структура мартенситного типа высокой твердости.

5. Показано, что требуемые характеристики рабочего слоя могут достигаться плазменной наплавкой материала аналогичного основному, без дальнейшей поверхностной термообработки. При таком варианте происходит изменение структуры наплавляемого металла и поверхностная термическая обработка металла основы, за счет нагрева плазменной дугой. Величина слоя наплавленного металла составляет несколько миллиметров, что в сумме с зоной поверхностного упрочнения основного металла позволяет получать достаточно большие по суммарной глубине (от 3 до 5,5 мм) слои высокой твердости (52 - 58 HRC). Экспериментально показано, что при схожих толщинах наплавляемого материала в зависимости от полярности меняется ширина наплавленного валика и глубина проплавления основного металла. При плазменной наплавке на токе прямой полярности ширина наплавляемого валика составляет от 12 до 15 мм, глубина проплавления основного материала 1,2 – 1,7 мм. Применение плазменной наплавки на токе обратной полярности позволяет при схожих параметрах режима увеличить ширину наплавляемого валика от 19 до 23 мм за один проход и уменьшить глубину проплавления основного металла (от 0,25 до 0,6 мм). Большая ширина наплавки за один проход позволяет увеличить производительность процесса и снизить риск перегрева изделия.
6. Разработана технология и подобраны режимы плазменного поверхностного упрочнения катков и плит однокатковой опорной части мостовой конструкции из высоколегированных коррозионно-стойких сталей типа 40X13, позволяющая осуществлять закалку поверхностного слоя (до 56 HRC) на глубину до нескольких миллиметров (4,5 мм.) с сохранением первоначальных свойств в массиве детали (15-20 HRC), и обеспечивающая приемлемое сочетание механических характеристик упрочненного слоя.
7. Применение технологии плазменного поверхностного упрочнения позволяет снизить почти на 20% затраты на материалы и энергоносители при изготовлении деталей однокатковой опорной части мостовой конструкции по сравнению с технологией наплавки высокопрочной стали на низколегированную сердцевину. Сокращение затрат на изготовление и дальнейшую механическую обработку позволяет компенсировать затраты на разработку проекта. При этом использование в качестве материала детали стали 40X13 обеспечивает лучшее сочетание прочностных и свойств коррозионной стойкости в массиве деталей по сравнению с использовавшейся, в качестве сердцевины деталей низколегированной стали 09Г2С.

Основные результаты диссертационной работы изложены в следующих публикациях:

- статьи в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК:

1. Белинин Д.С. Регулирование газодинамических параметров сжатой дуги на выходе двухкамерного плазмотрона / Ю.Д. Щицын, Н.Н. Струков, Д.С. Белинин, П.С.

- Кучев, И.Б. Фомин // Сварка и диагностика. – 2011. – № 6. – С. 14–16. (0,18 п.л. / 0,05 п.л.).
2. Белинин Д.С. Технологические варианты плазменной закалки на токе обратной полярности / Белинин Д.С., Щицын Ю.Д., Кучев П.С., Струков Н.Н. // *Фундаментальные проблемы техники и технологии*. 2012, № 3-2. с. 99 – 104. (0,31 п.л. / 0,15 п.л.).
 3. Белинин Д.С. Особенности структурообразования при плазменной поверхностной закалке на большую глубину изделий из стали 40X13 / Белинин Д.С., Щицын Ю.Д. // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2012, Т 14, №4(5). с. 1202 – 1205. (0,25 п.л. / 0,2 п.л.).
 4. Белинин Д.С. Плазменная наплавка сжатой дугой обратной полярности / Щицын Ю.Д., Белинин Д.С. // *Сварка и диагностика*. 2013, №6. с. 47 – 48. (0,13 п.л. / 0,05 п.л.).
 5. Белинин Д.С. Плазменная поверхностная термообработка высоколегированных сталей током обратной полярности / Белинин Д.С., Щицын Ю.Д. // *Современные проблемы науки и образования*. – 2014. – № 2 URL:<http://www.science-education.ru/116-12650>
 6. Белинин Д.С. Восстановительная наплавка малогабаритных изделий / Щицын Ю.Д., Неулыбин С.Д., Белинин Д.С., Кучева П.С. // *Современные проблемы науки и образования*. – 2014. – № 2; URL:<http://www.science-education.ru/116-12629>
- **статьи в изданиях, входящих в базу SCOPUS:**
 7. Belinin D.S. Wire Electrical Discharge Machining of Items After Plasmatic Surface Hardening / Ablyaz T.R., Belinin D.S. // *Middle – East Journal of Scientific Research [Electronic Resource]*. 2014. p. 1094 – 1098. (0,31 п.л. / 0,15 п.л.).
- **другие публикации:**
 8. Белинин Д.С. Получение упрочненных слоев высоколегированных сталей с заданными характеристиками методом плазменной закалки с оплавлением поверхности / Белинин Д.С., Щицын Ю.Д., Верхорубов В.С., Кучев П.С., Струков Н.Н. // *Инновационные технологии в машиностроении*. Пермь: ПНИПУ, 2012. с. 101 – 106. (0,375 п.л. / 0,25 п.л.).
 9. Белинин Д.С. Комбинированные варианты плазменной закалки на токе прямой полярности / Белинин Д.С., Неулыбин С.Д., Кучев П.С., Шилов А.Ю. // *Master’s Journal*. 2012, №2. с. 23 – 29. (0,43 п.л. / 0,25 п.л.).
 10. Белинин Д.С. Закалка тяжело нагруженных изделий на токе прямой полярности / Белинин Д.С., Неулыбин С.Д., Кучев П.С., Щицын Ю.Д. // *Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке*. [электронный ресурс]. Ижевск. ИжГТУ, 2013. с 147 – 151. (0,31 п.л. / 0,15 п.л.).
 11. Белинин Д.С. Упрочнение рабочих поверхностей изделий методом плазменной поверхностной закалки на токе обратной полярности / Белинин Д.С., Щицын Ю.Д., Кучев П.С., Неулыбин С.Д. // *Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке*. [электронный ресурс]. Ижевск. ИжГТУ, 2013. с 20 – 25. (0,375 п.л. / 0,2 п.л.).
 12. Белинин Д.С. Тепловые характеристики при однодуговом и комбинированном режиме работы плазматрона / Кучев П.С., Щицын Ю.Д., Белинин Д.С., Шилов А.Ю. // *Сварка. Реновация. Триботехника*. Нижний Тагил: НТИ (филиал) УРФУ, 2013. с. 46 – 49. (0,25 п.л. / 0,06 п.л.).
 13. Белинин Д.С. Повышение ресурса работы ротора пластинчатого насоса / Щицын Ю.Д., Белинин Д.С., Неулыбин С.Д., Кучев П.С. // *Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение*. 2013, №3. с 67 – 73. (0,44 п.л. / 0,15 п.л.).
 14. Белинин Д.С. Разработка технологии плазменной наплавки меди / Неулыбин С.Д., Щицын Ю.Д., Белинин Д.С., Кучев П.С. // *Наука. Технологии. Инновации*. Новосибирск, НГТУ. 2013, ч. 4 с. 183 – 187. (0,25 п.л. / 0,08 п.л.).
 15. Белинин Д.С. Исследование различных схем подключения двухкамерного плазматрона / Кучев П.С., Белинин Д.С., Шилов А.Ю., Щицын Ю.Д. // *Молодые*

- ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке.[электронный ресурс]. Ижевск. ИжГТУ, 2013. с 124 – 128. (0,31 п.л. / 0,08 п.л.).
16. Белинин Д.С. Использование тока обратной полярности для плазменной наплавки / Неулыбин С.Д., Белинин Д.С., Щицын Ю.Д., Кучев П.С. // Молодежь и наука[электронный ресурс]. Нижний Тагил: НТИ (филиал) УРФУ, 2013. с. 78 – 82. (0,31 п.л. / 0,08 п.л.).