

Федеральное государственное  
бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет»

*На правах рукописи*

Белинин Дмитрий Сергеевич

**Совершенствование технологии плазменной поверхностной обработки  
тяжелонагруженных изделий из высоколегированных сталей**

05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии

*Диссертация на соискание ученой степени*

*кандидата технических наук*

Научный руководитель:

Щицын Юрий Дмитриевич,

доктор технических наук

Пермь 2014

## Содержание

<b>Введение</b> .....	5
<b>1. Литературный обзор</b> .....	9
1.1. Устройство и принцип работы однокатковых опорных частей мостовой конструкции .....	9
1.2. Проблемы термообработки стали 40X13 .....	13
1.3. Поверхностное упрочнение материалов .....	20
1.3.1. Традиционные способы поверхностного упрочнения .....	20
1.3.2.Способы поверхностного упрочнения высоконцентрированными источниками энергии .....	21
1.4. Модификация рабочих поверхностей изделий с использованием плазменных технологий .....	23
1.4.1.Плазменная поверхностная закалка .....	24
1.4.2.Плазменная наплавка .....	27
<b>Цель и задачи исследования</b> .....	30
<b>2. Особенности тепловых процессов при работе плазмотрона на токах прямой и обратной полярности</b> .....	32
2.1. Тепловые процессы при плазменном нагреве .....	32
2.2. Сравнение тепловой обстановки на поверхности изделия при работе плазмотрона на токах прямой и обратной полярности .....	37
2.2.1. Исследование теплопередачи в изделие при работе плазмотрона на токах прямой и обратной полярности.....	37
2.2.1.1. Методика проведения эксперимента.....	37

2.2.2.2. Порядок проведения эксперимента .....	39
2.2.2.3. Исследование энергетических характеристик сжатой дуги.	40
<b>Выводы по главе 2 .....</b>	<b>46</b>
<b>3. Особенности теплопередачи в изделие при работе плазмотрона на токе обратной полярности .....</b>	<b>48</b>
3.1. Влияние полярности и параметров процесса на теплопередачу в изделие .....	48
3.1.1. Оценка площади теплового контакта плазменной дуги с изделием при работе плазмотрона на токе обратной полярности .....	60
3.2. Моделирование процесса теплопередачи в изделие при работе плазмотрона на токе обратной полярности .....	63
<b>Выводы по главе 3 .....</b>	<b>70</b>
<b>4. Исследование плазменной поверхностной обработки на токах прямой и обратной полярности .....</b>	<b>72</b>
4.1. Определение требуемых параметров режима плазменной закалки опорной пары мостовой конструкции .....	72
4.2. Влияние параметров режима плазменной закалки на токе прямой полярности на структуру и свойства упрочненной зоны .....	75
4.3. Влияние параметров режима плазменной закалки на токе обратной полярности на структуру и свойства упрочненной зоны. ....	78
4.4. Сравнительное исследование плазменной наплавки стали 40X13 на токах прямой и обратной полярности .....	83
4.5. Механические свойства стали 40X13 после плазменной поверхностной термообработки .....	93

4.6. Разработка схемы технологического процесса плазменной поверхностной закалки .....	97
4.6.1. Техничко – экономическая эффективность плазменного поверхностного упрочнения .....	99
<b>Выводы по главе 4 .....</b>	<b>107</b>
<b>Общие выводы по работе .....</b>	<b>110</b>
<b>Список литературы .....</b>	<b>113</b>
<b>Приложение 1 .....</b>	<b>128</b>
<b>Приложение 2 .....</b>	<b>136</b>

## **Введение**

Как правило, тяжело нагруженные детали воспринимают основную нагрузку своими поверхностными слоями. При статических и динамических нагрузках максимальные напряжения возникают в поверхностном слое изделия. При воздействии знакопеременной нагрузки разрушение от усталости также начинается в поверхностном слое. В случае работы изделия на износ от трения изнашивается только его рабочий слой глубиной в несколько миллиметров. Следовательно нет необходимости большинству таких деталей придавать одинаковые свойства по всему сечению [1].

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 (весом порядка 300 кг, диаметром 273 мм) перемещающийся между поверхностями опорных плит (весом порядка 80 кг, толщиной 40 мм). 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. Сталь 40X13 – высоколегированная коррозионно-стойкая сталь мартенситного класса. При высоких механических и антикоррозионных свойствах данная сталь имеет пониженные технологические свойства (плохая свариваемость, склонность к образованию холодных трещин, ликваций, отпускной хрупкости), что значительно осложняет применение традиционных известных способов объемного и поверхностного упрочнения.

Высокие требования к геометрии слоев упрочняемых изделий показывают, что ряд технологий поверхностного упрочнения достигли либо технологического потолка, либо не применимы к сталям рассматриваемой группы из-за особенностей их термообработки [2 - 4].

Перспективным направлением совершенствования технологий поверхностной обработки является разработка и внедрение процессов с использованием высококонцентрированных источников энергии, в том числе и плазменных технологий. Плазменная дуга обеспечивают мощное тепловое воздействие на зону обработки. Возможность регулирования концентрации энергии позволяет изменять как ширину и глубину обработки в широких пределах, так и управлять скоростью нагрева и охлаждения упрочняемого слоя [1 - 6]

Такие качества, как сравнительная простота и доступность оборудования, низкая стоимость, широкие технологические возможности, высокое качество обработки изделий из различных металлов позволяют плазменным технологиям на данном этапе успешно конкурировать с другими способами. [5, 7, 8]

При выборе того или иного способа нагрева высококонцентрированными источниками энергии в качестве основы для промышленной технологии необходимо исходить из следующих принципов: обеспечение требуемых характеристик; эффективность процесса; безопасность; доступность в реализации на практике; экономичность.

С точки зрения эффективности плазменный источник нагрева металла по своим теплофизическим возможностям несколько уступает лазерному и электронному лучам, но имеет большую производительность. Кроме того, при внедрении в массовое производство имеет минимальные финансовые инвестиции и эксплуатационные затраты.

В настоящее время разработан и успешно применяется ряд технологических процессов и установок, основанных на использовании низкотемпературной плазмы [7, 8]. В основном такие установки работают на токе прямой полярности.

Использование обратной полярности обеспечивает дополнительные преимущества для ряда плазменных технологий. Явление катодного распыления позволяет производить очистку поверхностей металлических заготовок. Применение плазмотронов с кольцевым анодом делает возможным использование высокопроизводительной плазменной сварки и наплавки плавящимся электродом различных металлов. Ведение процессов на обратной полярности позволяет в широких пределах регулировать тепловое и силовое воздействие на зону обработки, глубину и скорость нагрева основного металла, что актуально при проведении поверхностного упрочнения.

Считается, что при работе на обратной полярности, плазмотроны испытывают повышенные тепловые нагрузки, что приводит к усложнению конструкций плазмотронов, увеличению их габаритов и массы [9 - 11]. Отсутствие мощных, надежных, простых в эксплуатации и обслуживании плазмотронов сдерживает изучение и разработку плазменных технологий с использованием обратной полярности.

Несмотря на различие физических процессов, лежащих в основе того или иного способа поверхностного упрочнения металлов (плазменного, лазерного, электронно-лучевого и т. д.), для всех характерна общая особенность - фазовые и структурные превращения протекают в условиях далеких от равновесия, что сильно влияет на процессы образования аустенита, гомогенизации и распада. Вследствие высоких скоростей нагрева и охлаждения, конечные структуры поверхностного слоя стали неоднородны по химическому составу, механическим свойствам и т. д. Именно поэтому, для объяснения механизмов кинетики образования аустенита и последующих превращений недостаточно знаний с позиции классического термодинамического подхода фазовых превращений в системе железо-углерод т.к. он не учитывает влияние скорости нагрева и охлаждения на процессы зарождения и роста новой фазы, нестационарной диффузии, фактора границ зерна, наличие легирующих элементов.

Необходимо отметить, что применение поверхностной термообработки не только не исключает, а в целом ряде случаев увеличивает эффективность наплавки, поскольку позволяет использовать относительно дешевые материалы с меньшей твердостью наплавленного слоя [8, 12]. При этом наплавкой создают или восстанавливают требуемые геометрические размеры рабочих поверхностей изделий, а окончательный комплекс свойств формируют с помощью плазменной поверхностной закалки.

Таким образом, 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 сталям и чугунам, и позволяющие получить упрочненный слой глубиной не более 3 мм. В большинстве случаев процессы наплавки и термообработки выполняются на токе прямой полярности, что не всегда обеспечивает необходимый комплекс свойств упрочненного слоя. При плазменной закалке дугой прямой полярности не всегда удается получить равновесную структуру упрочненного слоя, а при наплавке получить необходимую ширину наплавленного валика без применения специальных сканирующих механизмов.

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.

## **1. Литературный обзор.**

### **1.1. Устройство и принцип работы однокатковых опорных частей мостовой конструкции.**

Опорные части являются важными элементами мостов, обеспечивающими расчетные условия работы всех конструкций – пролетных строений, опор, примыкающих к мосту насыпей и подходов [13, 14].

До последнего времени основными типами опорных частей в мостах как под железную, так и под автомобильную дорогу были стальные опорные части, применявшиеся в мостостроении в течение длительного времени.

Использование современных конструкций и технологий, применение новых материалов с улучшенными физико-механическими характеристиками привели к разработке новых типов опорных частей, небольших по габаритам и менее материалоемких [14 - 16].

Согласно данным отечественной и зарубежной статистики, средний срок службы мостов составляет 100 лет, а их опорных частей (ОЧ) – не превышает 30 лет. Последние приходится заменять не менее трех раз, что является дорогостоящей, а с учетом огромной массы мостовых пролетов, и чрезвычайно трудоемкой операцией.

До сих пор при строительстве большепролетных мостов применялись в основном многокатковые опорные части, для которых не гарантировались коэффициент трения качения, технологическая прочность, твердость и коррозионная стойкость контактных поверхностей. В результате при длительной эксплуатации изменялся характер опирания пролетных строений на опорные части, подвижные опорные части заклинивали, менялась расчетная схема сооружения, появлялись дефекты на опорах и в пролетах [18].

Простейшими по конструкции и самыми современными по функциональной способности являются однокатковые опорные части (ОКОЧ), состоящие из двух опорных плит и катка между ними. Однако применение однокатковых опорных частей сдерживается из-за низкой

несущей способности углеродистых и низколегированных сталей, рекомендуемых СНиП 2.05.03-84 для их изготовления [17].

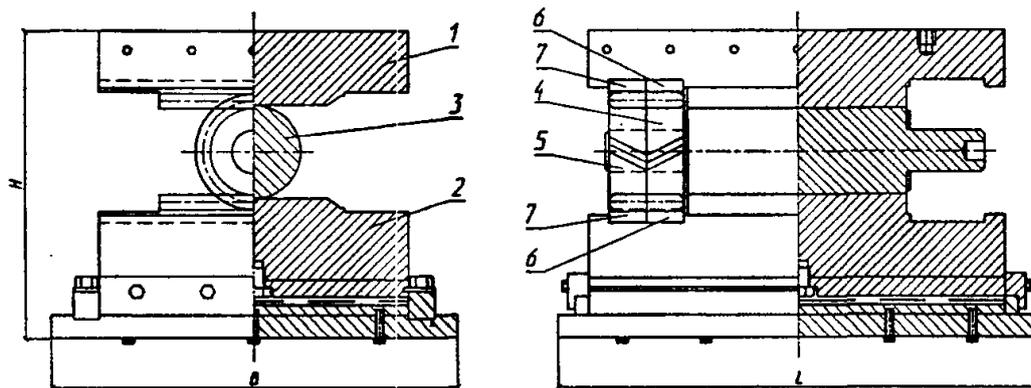
В катковых опорных частях металлический каток обеспечивает минимальное сопротивление трения, если поверхность скольжения свободна от грязи и ржавчины, а сопрягающиеся детали изготовлены точно.

Катковые опорные части более, чем другие типы опорных частей чувствительны к сопротивлению трения. Обеспечение обязательных геометрических требований и правильности положения катков в плане требует введения дополнительных элементов, что приводит к усложнению конструкции, увеличению расхода металла и стоимости изготовления. Катковые опорные части чувствительны к поперечному крену опор, возникающему достаточно часто в процессе эксплуатации, и к поперечным деформациям пролетных строений, прежде всего к изгибным деформациям поперечных балок или диафрагм.

В однокатковых опорных частях с помощью катка реализуются как горизонтальные перемещения, так и повороты опорного сечения. В результате для небольших нагрузок и перемещений могут быть получены сравнительно простые конструкции.

Стремление увеличить нагрузки на однокатковые опорные части без существенного увеличения диаметров катков привело к использованию для катков высокопрочных сталей. С учетом характера передачи усилий эти стали в виде высокопрочных вставок или наплавов применяют только в зонах контакта, то есть там, где действуют высокие местные напряжения. На *рис. 1.1* приведена однокатковая опорная часть (ОКОЧ) из серии опорных частей под нагрузку от 2000 до 30000 кН с перемещениями до  $\pm 250$  мм. По диаметру катков эта серия включает 4 типа: 100, 150, 200 и 250 мм. Столь малые диаметры получены за счет применения для катков и плит качения наплавов толщиной до 20 мм из стали 40Х13. В качестве основного металла использована сталь 09Г2С [19].

Как и в других конструкциях катковых опорных частей, ОКОЧ включают опорные плиты 1 и 2, каток 3 и противоугонные устройства, состоящие из зубчатых венцов на катке 4, 5 и зубчатых реек на плитах 6, 7.



*Рис. 1.1. Однокатковая опорная часть (ОКОЧ) с наплавками из высокопрочной стали:*

*1, 2 – опорные плиты; 3 – каток; 4, 5 – зубчатые венцы; 6, 7 – зубчатые рейки.*

При использовании ОКОЧ в широких мостах с расстоянием между опорными частями в поперечном направлении более 14 м под нижней плитой качения устраивается пара скольжения, состоящая из полированного листа с фторопластовыми вкладышами. Эта пара скольжения обеспечивает горизонтальные перемещения в поперечном направлении.

Для уменьшения расхода металла и веса катков используют срезные катки или валки. Валок такой опорной части выполняется из литейных сталей типа 25Л и имеет в поперечном сечении двутавровую форму с ребрами жесткости.

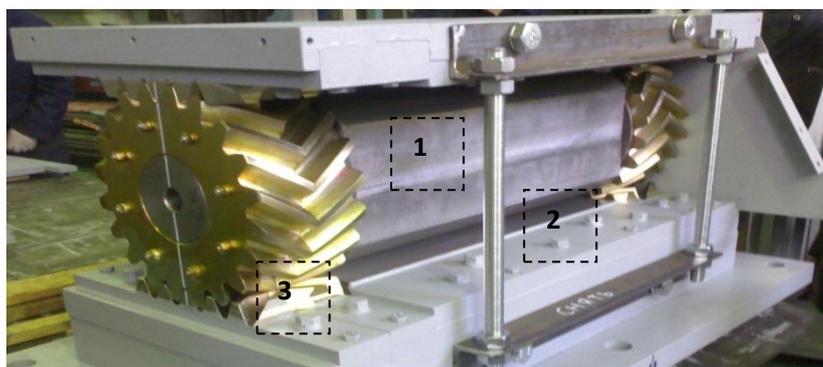
Радиус цилиндрических поверхностей в срезном катке или валке обычно принимают несколько большим, чем половина его высоты. При этом уменьшаются напряжения смятия и повышается устойчивость положения катка, так как при его отклонении от вертикального положения пролетное строение получает вертикальное перемещение, направленное вверх, что вызывает момент, стремящийся вернуть каток в прежнее положение.

На сегодняшний день разработчиками предлагается идея получения рабочих контактных поверхностей ОКОЧ при помощи наплавки высокопрочных сталей [16], обеспечивающих высокие значения твердости и

имеющих достаточную стойкость против атмосферной коррозии. Применение таких опорных частей, отличающихся высокой надежностью, низки коэффициентом трения, малой материалоемкостью и минимально возможной строительной высотой, позволяет увеличить срок их службы и уравнивать его со сроком эксплуатации моста.

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 представленной работе разрабатывалась технология получения упрочненного слоя опорной пары мостовой конструкции со следующими характеристиками: твердость поверхностного слоя 49 - 54 HRC, глубина упрочненного слоя 4 мм, твердость на глубине 4 мм не ниже 42 HRC, с сохранением исходных свойств в сердцевине изделия. Конструкция (рис 1.2) массивная и габаритная, вес катка порядка 300 кг, вес плиты порядка 80 кг [20].



*Рис.1.2. Внешний вид опорной пары мостовой конструкции:*

*1 – каток; 2 – опорная плита; 3 – шевронная передача.*

Материал катка и плиты – коррозионно-стойкая сталь мартенситного класса 40X13. Благодаря малой критической скорости закалки стали 40X13 закаливаются на мартенсит при охлаждении на воздухе [21].

## 1.2. Проблемы термообработки стали 40X13.

Сталь 40X13 – высоколегированная, коррозионно-стойкая, жаропрочная сталь мартенситного класса. Самым распространённым легирующим элементом в жаропрочных сталях и сплавах является хром. Благоприятное влияние, оказываемое хромом на жаростойкость и жаропрочность, является основной причиной, по которой хром введён во все стали, предназначенные для длительного использования при высоких температурах в условиях постоянного контакта поверхности металла с кислородом и азотом воздуха или с продуктами сгорания углей, природного газа или мазута различной степени загрязнённости агрессивными добавками ванадия, серы и другими компонентами. В коррозионностойких сталях хром играет двойную роль. При его содержании более 12% резко повышается электрохимический потенциал стали, сталь «облагораживается» и становится более устойчивой в растворах электролитов. В то же время хром способствует образованию на поверхности металла плотной и достаточно прочной оксидной плёнки, защищающей металл от воздействия коррозионно-активной среды. Эта же стойкая плёнка хрома защищает сталь от окисления при высоких температурах – повышает её жаростойкость. Таким образом, высокохромистые стали оказываются стойкими против химической и электрохимической коррозии в окислительных средах [22, 23].

Наряду с высокой коррозионной стойкостью стали, содержащие 12 - 14% Cr, имеют высокие прочность и жаропрочность (значительно выше, чем у низко- и среднелегированных хромистых и хромомолибденовых сталей) [22, 24].

В связи с указанным сочетанием свойств высокохромистые стали находят широкое применение в различных областях народного хозяйства. При высоких механических и антикоррозионных свойствах высокохромистые стали имеют пониженные технологические свойства, в том числе пониженную свариваемость, склонность к отпускной хрупкости, образованию ликваций, холодных трещин. Это связано с особенностями

фазового состояния высокохромистых сталей и особенностями структурных и фазовых превращений, происходящих при нагреве и охлаждении [24 – 26].

Хром относится к легирующим элементам, стабилизирующим в железных сплавах  $\alpha$ -фазу и уменьшающим область существования  $\gamma$ -фазы. Введение в железо-хромистые сплавы других феррито-стабилизирующих элементов (Mo, W, V, Ti, Si и др.) ещё больше сужает  $\gamma$ -область, в то же время аустенито-стабилизирующие элементы (C, Mn, Ni, Cu) её расширяют. Углерод, кроме того, приводит к образованию карбидов хрома, обедняя хромом твёрдый раствор [21,27,28].

О фазовом и структурном состоянии сплавов железо-хром и высокохромистых сталей с разным количеством хрома и содержащих углерод и другие легирующие элементы, можно судить по диаграмме [24] на рис. 1.3.

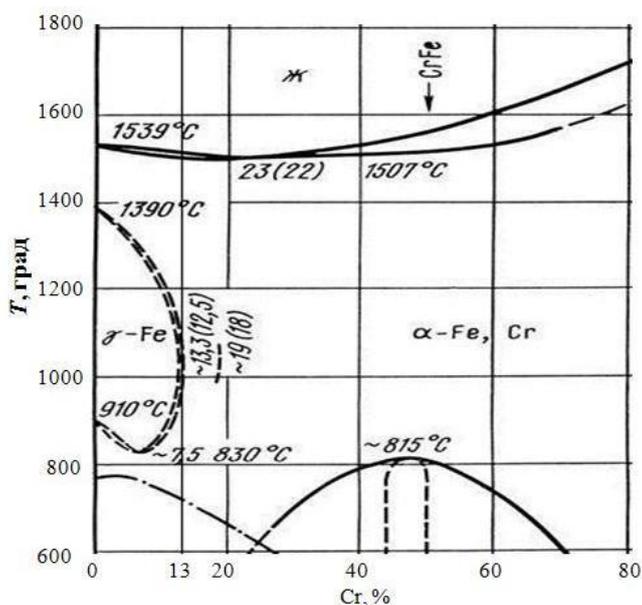


Рис. 1.3. Диаграмма состояния сплавов Fe – Cr

Мартенситные высокохромистые стали – это основная группа высоколегированных хромистых сталей. Они содержат 8 -14%Cr и 0,06 – 0,4%С, а для придания специальных свойств и другие легирующие элементы. Наличие в сталях углерода при высоком содержании хрома позволяет получать сочетание коррозионной стойкости и различной степени упрочнения при мартенситном превращении [28].

В связи с наличием полиморфного превращения эти стали можно подвергать термической обработке. Твёрдость стали после нагрева выше  $A_{c3}$  (до  $\gamma$ -состояния) и охлаждения как в масле, так и на воздухе одинакова, что свидетельствует о том, что при охлаждении в широком интервале скоростей структура стали в основном мартенситная, хотя при более медленном охлаждении в стали может сохраниться определённое количество феррита [21, 29].

Повышение содержания углерода в сталях с 13% Cr снижает сопротивление коррозии. Особенно заметно увеличивается скорость коррозии при повышении содержания углерода более 0,3%. Объясняется это тем, что при отжиге при наличии углерода в стали образуются карбиды хрома, в основном  $Cr_{23}C_6$ . При этом твёрдый раствор существенно обедняется хромом, что снижает электро-химический потенциал и её коррозионную стойкость. Таким образом, процесс образования карбидов в высокохромистых сталях неблагоприятно влияет на их коррозионную стойкость [29].

Хромистые стали рассматриваемой группы помимо высокой коррозионной стойкости обладает и другими важными свойствами – повышенными жаропрочностью и жаростойкостью. Кроме того, при достаточном содержании углерода в таких сталях они закаляются на мартенсит даже при охлаждении на воздухе. Характерно, что мартенситный распад в этих сталях происходит при довольно низкой температуре (150 – 250<sup>0</sup>C), что обуславливает значительное искажение и напряжённость структуры с повышенной плотностью дислокаций. В дополнение к этому наличие в такой стали карбида хрома, устойчивого и относительно трудно коагулируемого (типа  $Cr_{23}C_6$ ) при содержании в стали 12% Cr и более, приведут к дополнительному упрочнению мартенсита за счёт блокирования частицами карбида имеющихся дислокаций [27, 30].

Наряду с положительным влиянием Mo, V и W на жаропрочность необходимо считаться с тем, что эти элементы стабилизируют  $\alpha$ -фазу, способствуя сужению  $\gamma$ -области. Поэтому они могут способствовать

увеличению количества феррита в стали, делая её не полностью мартенситной, а мартенситно-ферритной. Появление в таких сталях феррита более 20% способствуют снижению прочности и жаропрочности. Для повышения устойчивости  $\gamma$ -фазы, расширения  $\gamma$ -области и уменьшения количества феррита в легированные стали иногда вводят небольшое количество никеля. Это позволяет одновременно уменьшить критическую скорость охлаждения и снизить температуру мартенситного распада, получая некоторое повышение прочности [21,24,28]. Однако, легирование Mo, V и W повышает стоимость стали

В табл.1.1 приведён состав стали[23]

Таблица 1.1  
Химический состав стали 40X13

Марка стали	Содержание элементов									
	C	Cr	Si	Mn	Ni	Mo	V	S	P	прочие
40X13	0,35-0,44	12,0-14,0	$\leq$ 0,8	$\leq$ 0,8	-	-	-	$\leq$ 0,025	$\leq$ 0,025	-

Механические свойства высокохромистых мартенситных сталей и их сварных соединений определяются их фактическим химическим составом и режимом термической обработки, с помощью которой можно регулировать, как свойства самой мартенситной матрицы, так и конечный фазовый состав и структуру сталей (табл.1.2). Существенное влияние на механические свойства оказывают также количество, величина и геометрическая форма  $\delta$ -феррита, в общем случае способствующего снижению пластичности и ударной вязкости без существенного влияния на пределы прочности и текучести [23].

Повышенная склонность мартенситных сталей к хрупкому разрушению в состоянии закалки усложняет технологию их обработки. При содержании углерода более 0,1 % мартенситные стали склонны к образованию холодных трещин из-за высокой степени тетрагональности кристаллической решётки мартенсита [31].

Таблица 1.2  
Механические свойства стали 40X13

<b>Нормированные механические свойства при 20 °С</b>					
<i>ГОСТ</i>	<i>Вид продукции</i>	<i>Режим термической обработки</i>	$\sigma_B, \text{Н/мм}^2$	$\delta_5, \%$	<i>HRC</i>
ГОСТ 5582 - 75	Лист тонкий	Отжиг или отпуск при 740-800°C	550	15	14-22
ГОСТ 5949 - 75	Сортовой прокат	Закалка с 1000-1050°C; охлаждение в масле; отпуск при 200-300°C; охлаждение на воздухе или в масле	-	-	50
<b>Механические свойства при повышенных температурах</b>					
$t_{исп}, \text{°C}$	$\sigma_B, \text{Н/мм}^2$	$\sigma_{0,2}, \text{Н/мм}^2$	$\delta_5, \%$	$\Psi, \%$	$KCU, \text{Дж/см}^2$
<i>Закалка с 1050°C на воздухе, отпуск при 600°C, твердость 311-331 HB</i>					
20	1140	910	12,5	32	12
200	960	830	11	40	50
300	920	730	10	38,5	70
400	795	685	11,5	45	75
500	530	475	19,5	76,5	80
600	310	260	21	84	120
<i>Закалка с 1050°C на воздухе, отпуск при 650°C, твердость 277-286 HB</i>					
20	950	725	14	41,5	25
400	-	-	-	-	95
450	650	555	15	44	-
500	555	-	18	67	135

Холодные трещины являются одним из видов локального разрушения соединений. При образовании холодных трещин определяющими являются три фактора: закалочные структуры, повышенный уровень напряжений первого рода и насыщенность металла водородом. Склонность сталей к образованию холодных трещин связана с их закаливаемостью – повышением твердости под воздействием термического цикла нагрева и насыщением металла водородом [32]. Поскольку закаливаемость сталей возрастает с повышением степени легированности, склонность к образованию холодных трещин ориентировочно оценивается показателем эквивалента углерода [21] С<sub>экв</sub> (1.1).

$$C_{\text{экв}} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{5} + \frac{V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} \quad (1.1)$$

При снижении содержания углерода вязкость мартенсита повышается, однако образующийся при этом структурно свободный δ-феррит в свою

очередь сообщает им высокую хрупкость. Поэтому трещины могут наблюдаться в процессе непрерывного охлаждения при температурах ниже  $T_{м.н.}$ , а также в процессе выдержки при нормальной температуре (замедленное разрушение).[29]

Для высокохромистых сталей температура начала мартенситного превращения не превышает  $360^{\circ}\text{C}$ , а окончания  $240^{\circ}\text{C}$ . С увеличением содержания углерода точки  $T_{м.н.}$  и  $T_{м.к.}$  ещё более понижаются, что приводит к возрастанию твёрдости мартенсита и его хрупкости. Мартенситное превращение в них имеет две особенности, отрицательно влияющие на образование холодных трещин. При охлаждении сталей с температур нагрева аустенитного состояния (полного или частичного) мартенситный распад происходит в широком интервале скоростей охлаждения, что обуславливает обязательное образование в обработанной зоне полностью мартенситной структуры иногда даже с некоторым количеством аустенита (повышенное содержание углерода, легирование никелем) или феррита (низкое содержание углерода, легирование ферритообразующими элементами). Другая особенность мартенситного превращения, обуславливающая повышенную склонность к образованию холодных трещин состоит в том, что мартенситный распад происходит при пониженной температуре ( $\sim 150^{\circ}\text{C}$ ), исключающей протекание процессов самоотпуска. Образующийся в этих условиях мартенсит имеет повышенный уровень микронапряжений и плотность дислокаций, оказывающихся заблокированными, поэтому обладает повышенной хрупкостью [27,28 - 30].

В связи с тем, что мартенситные, в том числе и жаропрочные высокохромистые стали, являются термически улучшаемыми и используются после закалки и высокого отпуска, участки ЗТВ, нагревавшиеся при обработке до температуры, близкой к  $A_{C1}$  разупрочняются. Чтобы избежать такого разупрочнения требуется проведение сложной термообработки – нормализации с отпуском [29, 33]. Наилучшее сочетание свойств стали 40X13 обеспечивается при закалке  $1000 - 1050^{\circ}\text{C}$  в масле либо на воздухе с

дальнейшим отпуском 200-600 °С, при этом обеспечивается твердость порядка 55 HRC.

### **1.3. Поверхностное упрочнение материалов.**

В результате поверхностной термообработки увеличивается твердость поверхностных слоев изделия с одновременным повышением сопротивления истиранию и предела выносливости [8, 12, 34].

Общим для всех видов поверхностной закалки является нагрев поверхностного слоя детали до температуры закалки с последующим быстрым охлаждением. Эти способы различаются методами нагрева деталей [35]. Толщина и свойства закаленного слоя при поверхностной закалке определяется глубиной и скоростью нагрева, скоростью охлаждения [1, 8, 36].

#### **1.3.1. Традиционные способы поверхностной закалки.**

В зависимости от способов нагрева различают несколько видов поверхностной закалки:

***Закалка погружением*** – разогрев поверхности ведется за счет кратковременного погружения детали в горячую среду. После нагрева детали охлаждают в воде или масле. Толщина закаленного слоя определяется временем выдержки в горячей среде. Недостатки – сложность технологического процесса и оборудования, высокая стоимость [37].

***Газопламенная закалка.*** Разогрев поверхности детали проводится за счет нагрева пламенем газовой горелки. Достоинство способа в его универсальности. Недостатки метода: невысокая производительность; сложность регулирования глубины закаленного слоя и температуры нагрева (возможность перегрева). Пламенную поверхностную закалку применяют главным образом для закалки изделий с большой поверхностью, при индивидуальном производстве и ремонте [38].

***Закалка ТВЧ*** – токами высокой частоты (индукционная закалка). Перед закалкой ТВЧ изделие подвергают нормализации. Разогрев детали производится за счет наведения в ней токов высокой частоты. Деталь помещается внутрь индуктора, подключенного к источникам токов высокой частоты. Достоинство способа – высокая производительность. Основной

недостаток метода – высокая стоимость индукционных установок и индукторов, для каждой детали необходим свой индуктор, наличие вредных электромагнитных полей. Целесообразно использовать в серийном и массовом производстве для случая однотипных деталей. Максимально возможная глубина упрочненного составляет 3 мм и достигается с оплавлением поверхности[39].

**Химико-термическая обработка** – одно из средств улучшения качества стальных деталей – повышения их прочности, твёрдости и износостойкости, заключающаяся в насыщении поверхности углеродом, азотом, хромом, бромом и другими элементами. При введении в поверхностный слой хрома, кремния, алюминия и других элементов можно придать изделию устойчивость против коррозии, жаростойкость, кислотоупорность и другие свойства [1, 39, 40].

### **1.3.2. Способы поверхностного упрочнения**

#### **высококонцентрированными источниками нагрева.**

Основной отличительной особенностью методов поверхностного упрочнения высококонцентрированными источниками нагрева является возможность получения скоростей нагрева и охлаждения материалов, на порядок превышающих значения, характерные для традиционных методов. Это способствует образованию структур поверхностного слоя с недостижимым ранее сочетанием эксплуатационных свойств. В процессе многочисленных исследований установлено, что скорость нагрева и охлаждения поверхностного слоя металла, структура и свойства упрочненной зоны определяются в первую очередь степенью локализации ввода тепла в обрабатываемое изделие (в пятно нагрева) [8, 36]. От этого зависят и важны для практики такие факторы, как величина остаточных напряжений и деформаций, необходимость применения дополнительных охлаждающих сред, производительность обработки, технико-экономические показатели. В общем случае порядок величины скорости охлаждения ( $^{\circ}\text{C}/\text{с}$ ) практически соответствует порядку величины концентрации тепловой мощности ( $\text{Вт}/\text{см}^2$ )

источника. Основные характеристики локальных источников нагрева для поверхностного упрочнения приведены в табл. 1.4 [8, 41].

К способам поверхностной термообработки высоконцентрированными источниками энергии относятся: закалка с нагревом поверхности лазером, электронно-лучевая обработка, плазменная поверхностная термообработка.

Таблица 1.4

Основные технико-экономические характеристики источников нагрева

Источник нагрева	Мощность, <i>Вт</i>		Плотность мощности, <i>Вт/см<sup>2</sup></i>		Эффективный КПД нагрева
	<i>min</i>	<i>max</i>	<i>min</i>	<i>max</i>	
Газовое пламя	$10^2$	$10^4$	$2 \cdot 10^2$	$6 \cdot 10^2$	0,55
Электрическая дуга	50	$2 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^2$	$4 \cdot 10^4$	0,75
Сжатая дуга	$10^2$	$10^5$	$5 \cdot 10^2$	$10^6$	0,80
Плазменная струя	$10^3$	$10^5$	$5 \cdot 10^2$	$10^5$	0,80
Луч:					
ионный	10	$10^3$	$10^2$	$10^5$	0,85
электронный	10	$10^5$	$5 \cdot 10^2$	$10^7$	0,85
лазерный	10	$2,5 \cdot 10^4$	$10^2$	$10^{10}$	0,05
Солнечные нагреватели	$10^2$	$10^5$	$10^2$	$2 \cdot 10^3$	0,75

**Закалка с нагревом поверхности лазером.** При этом способе закалки разогрев поверхности осуществляется за счет воздействия на неё высокоэнергетического пучка излучения. Перемещая луч лазера по поверхности можно закаливать как отдельные участки детали, так и всю её поверхность. Этим способом можно закаливать внутренние поверхности детали, не закаливая её наружную поверхность [42, 43]. Глубина закаленного слоя регулируется временем воздействия лазера.

При этом твердость упрочненной лазерным лучом зоны поверхности, например, стали 40Х составляет 58 – 62 HRC [34, 35, 44].

Недостатками лазерной обработки являются высокая сложность и стоимость оборудования, низкий КПД лазеров, малая глубина упрочненного слоя.

**Электронно-лучевая обработка.** Здесь обработка поверхности производится мощным электронным пучком в вакуумной среде. При этом необходима защита оператора от рентгеновского излучения, что препятствует широкому массовому распространению такого упрочнения [45]. Преимущества по сравнению с лазерной обработкой: более высокий КПД; более высокая мощность; меньшая стоимость.

**Плазменная поверхностная термообработка** сочетает в себе высокую технологическую и экономическую эффективность, доступность технологического оборудования [46-49]. Накопленный опыт по практическому применению плазменного поверхностного упрочнения позволяет выделить следующие варианты [8]:

- упрочнение без оплавления и с оплавлением по поверхности детали;
- упрочнение с зазором между упрочненными зонами (ЗТВ), без перекрытия ЗТВ и с перекрытием ЗТВ;
- химико-термическая плазменная обработка;
- упрочнение в сочетании с другими способами объемной или поверхностной термической обработки.

Подробнее о плазменном упрочнении будет изложено далее.

#### **1.4. Модификация рабочих поверхностей изделий с использованием плазменных технологий.**

Практическое использование плазменных технологий в развитых странах - США, Англии, Германии, СССР началось с середины 60-х годов. По ряду направлений отечественные разработки опережали западные. Исследованием технологий плазменного упрочнения и разработкой оборудования для их практической реализации занимался ряд центров в СССР, а позднее в СНГ - ИЭС им. Е.О. Патона, ВНИИЭСО, Ленинградский политехнический институт, УрФУ (бывш. УПИ) и другие отраслевые институты. Такие крупные ученые как Л.К. Лещинский, С.С. Самотугин, Г.И.

Лашенко, Е.Н. Сафонов, В.А. Коротков и др. участвовали в разработке теоретических основ технологий плазменного поверхностно упрочнения и технологических рекомендаций их практического применения.

#### **1.4.1. Плазменная поверхностная закалка**

Плазменное поверхностное упрочнение как один из методов упрочнения высоконцентрированными источниками нагрева в настоящее время находит широкое и эффективное применение как в условиях мелкосерийного и единичного (в том числе ремонтного), так и крупносерийного и массового производства. Сущность его заключается в термических фазовых и структурных превращениях, происходящих при быстром концентрированном нагреве рабочей поверхности детали плазменной струей (дугой) и теплоотводе в материал детали [8, 12, 36, 50].

Для генерирования плазменного источника нагрева широко используются плазмотроны с открытой дугой или прямого действия (положительный заряд подается на упрочняемую деталь) и плазмотроны с закрытой дугой – струей или косвенного действия (отрицательный и положительный заряды подаются на детали плазмотрона – соответственно катод и анод) [5, 48, 51, 52].

Скорость нагрева оказывает существенное влияние на размер рекристаллизованного зерна, так как с ее увеличением число центров рекристаллизации растет быстрее, чем скорость роста центров. Это способствует измельчению зерна [53]. Кратковременное пребывание стали в области закалочных температур и протекание фазовых превращений при температурах, превышающих равновесные, приводят к получению механических свойств, отличающихся от свойств стали, закаленной с нагревом от традиционных источников теплоты [54].

Применение быстрого нагрева, способствующего получению более мелкой структуры закаленной стали, дает возможность получить более благоприятное сочетание свойств прочности и вязкости [55].

Повышение уровня эксплуатационных свойств поверхностного слоя детали достигается за счет обеспечения оптимального термического цикла

(нагрева – охлаждения) исходя из закономерностей структурных, фазовых и полиморфных превращений упрочняемого материала [56, 57].

Нагретая зона охлаждается сразу при выходе из плазмы, в основном, за счет отвода теплоты в тело массивной стальной детали, кондуктивного и радиационного теплоотвода с поверхности в атмосферу.

Плазменная обработка может эффективно применяться для упрочнения не только деталей из стали, но и из чугуна. В этом случае широко используются в основном способы плазменного упрочнения с оплавлением рабочей поверхности, обеспечивающие создание на ней отбеленного слоя с дисперсной дендритной структурой. При этом скорость охлаждения расплава составляет примерно  $10^4$  °C/c, что и обуславливает высокую степень дисперсности закристаллизовавшейся структуры [8, 57 - 62].

Для регулирования скорости нагрева и охлаждения, а также ширины и глубины закалки используют сканирование пятна нагрева. В обычном варианте плазменной закалки источник нагрева перемещается относительно обрабатываемой поверхности прямолинейно. При обработке со сканированием дополнительно совершает возвратно-поступательное перемещение в поперечном основному движению направлении, обеспечивая многократный пробег пятна нагрева в пределах определенной площади. Степень локализации ввода тепла в обрабатываемую поверхность при этом уменьшается [36].

Сканирование позволяет увеличить производительность процесса, геометрические размеры (ширину и глубину) локальной зоны закалки. Глубина зоны возрастает вследствие уменьшения средней скорости нагрева до предзакалочной температуры при меньшей плотности теплового потока. За счет сканирования удастся снизить скорость основного поступательного перемещения дуги, при которой начинается оплавление поверхности. Совокупность этих факторов расширяет интервал режимов термообработки, обеспечивающий изменение структуры и свойств в зоне термического влияния, вследствие более полной гомогенизации аустенита при увеличенной продолжительности нагрева [63, 64].

При нагреве поверхности дугой постоянного тока прямого действия сканирование эффективно реализуется за счет взаимодействия внешнего переменного магнитного поля, создаваемого соленоидом, с собственным полем дуги. Частоту внешнего поля можно изменять, но чаще используется воздействие с частотой 50 Гц, при этой частоте температурное поле от сканирующего источника можно считать стационарным, а тепловой поток - постоянным, равномерно распределенным по всей ширине обрабатываемого участка.

По сравнению с аналогами – способами поверхностного упрочнения токами высокой частоты, газопламенным, химико-термической обработки, лазерным и электронно-лучевым упрочнением, данный процесс имеет преимущества:

- низкие интегральные температуры нагрева деталей;
- большая глубина упрочненного слоя по сравнению, например, с лазерной закалкой;
- высокий эффективный КПД нагрева плазменной дугой до (85%), для сравнения, при лазерном упрочнении – 5%;
- возможность ведения процесса без применения охлаждающих сред, вакуума, специальных покрытий для повышения поглощательной способности упрочняемых поверхностей;
- простота, низкая стоимость, маневренность, малые габариты технологического оборудования;
- возможность автоматизации и роботизации технологического процесса.

Несмотря на положительные результаты применения плазменной поверхностной термической обработки, её широкое промышленное применение затруднено рядом причин:

- во-первых, ограничена номенклатура материалов подвергаемых плазменной закалке.
- во-вторых, часть результатов получена с использованием серийного оборудования для воздушно-плазменной резки. Известно, что в составе

таких установок используются источники питания дуги с высоким (180 В) напряжением холостого хода. Для получения стабильных результатов требуется оптимизация целого ряда параметров, обеспечивающих надежное возбуждение дуги, однородность плазменной струи, бесперебойный режим работы плазмотрона, долговечность катода и сопла.

- в-третьих, результатов, пригодных для систематизации данных и разработки промышленно применимых процессов термообработки распространенными в сварочных технологиях плазмотронами прямого действия, явно недостаточно.
- в – четвертых, максимальная глубина упроченного слоя на сегодняшний день составляет 1,5 – 2,5 мм, чего для некоторых конструкций и изделий явно недостаточно. При этом происходит изменение рельефа рабочих поверхностей, что оправдано лишь для деталей металлургического оборудования.

#### **1.4.2. Плазменная наплавка.**

Применение наплавки рабочих поверхностей позволяет повысить их долговечность и износостойкость путем нанесения металла соответствующего химического состава и физико-механических свойств [45].

Сущность плазменной наплавки состоит в расплавлении присадочного металла струей плазмы и перенесении его на основной металл. При этом расплавляется поверхностный слой основного металла и вместе с расплавленным присадочным материалом образует слой наплавленного металла. [45, 65]

Одним из важных параметров процесса наплавки является глубина проплавления основного металла: чем меньше глубина проплавления, тем меньше доля участия основного металла в наплавленном [66].

На глубине проплавления располагается переходная зона от основного металла к наплавленному. Для некоторых материалов эта зона считается наиболее опасной, с точки зрения разрушения металла. Металл переходной зоны охрупчен из-за большой скорости охлаждения металла шва, имеет

повышенную склонность к образованию холодных трещин по причине большой неоднородности химического состава металла и соответственно большой разности коэффициентов линейного расширения. Отсюда следует, что чем больше глубина проплавления, тем больше зона ослабленного участка и тем ниже прочность детали. И наоборот, чем меньше глубина проплавления, тем в меньшей мере теряется прочность детали [45, 67]. На глубину проплавления основного металла и свойства переходной зоны влияют погонная энергия процесса и соответственно скорость охлаждения [45, 66, 68].

Скорость охлаждения металла при наплавке в основном определяется погонной энергией процесса, хотя в определенной степени она зависит от размеров детали, подвергаемой наплавке, свойств основного металла, температуры предварительного подогрева и разогрева наплавленного металла в процессе наплавки [69].

Исходя из изложенного, выбор оборудования для наплавки, режимов и технологии должен проводиться из условия обеспечения минимальной глубины проплавления основного металла [65, 66].

Погонную энергию при наплавке обычно рассчитывают по уравнению [69]:

$$E_n = IU_d \eta / v_d \quad (1.2)$$

где:  $E_n$  - погонная энергия, Дж/см;  $U_d$  - напряжение на дуге, В;  $I$  - сила тока, А;  $\eta$  - КПД электрической дуги;  $v_d$  - скорость наплавки, см/с.

Выбор режимов наплавки зависит от толщины наплавленного слоя. Выбор наплавочных материалов производится исходя из требований, предъявляемых к металлу трущихся поверхностей в зависимости от вида изнашивания. Например, для условий абразивного изнашивания требуется высокая твердость наплавленного металла, которая обеспечивается использованием наплавочных материалов с повышенным содержанием углерода, хрома, марганца, вольфрама. Для условий коррозионного изнашивания стойкость достигается легированием металла хромом в количестве больше 12% (нержавеющие стали). Выполнение

наплавочных работ осуществляется различными способами, основными из которых являются ручная дуговая наплавка, автоматическая дуговая наплавка под флюсом, наплавка в среде защитного газа, вибродуговая, плазменная и газовая наплавка [70].

В качестве наплавочного материала могут использоваться не только проволоки и порошки металлов, но и неметаллов(керамический порошок). Это позволяет нанести керамику на металлы, что позволяет достигать требуемого качества изделия и решать актуальные задачи повышения долговечности деталей и узлов машин [45,65, 70 - 72].

Применение плазменной дуги прямого действия позволяет не только осуществить наплавку материала обеспечивающего требуемый комплекс свойств, но и одновременно проводить поверхностную термическую обработку основного материала детали, увеличивая геометрические характеристики упрочняемого слоя.

Для широкого использования процессов плазменной поверхностной термообработки с целью получения упрочненных слоев требуемых геометрических и прочностных характеристик необходимо установить научно обоснованные закономерности формирования структуры и свойств модифицируемых рабочих слоев. На основе этих закономерностей разработать технологические процессы упрочнения с рациональными режимами обработки изделий из высоколегированных коррозионностойких сталей мартенситного класса и оборудование обеспечивающее надежную и бесперебойную работу на требуемых режимах

Исходя из вышесказанного, **целью работы** является: формирование рабочих поверхностей деталей однокатковой опорной части мостовой конструкции из стали 40X13 с твердостью 52 – 42 HRC на глубину не менее 4 мм.

**Задачи работы**, решение которых необходимо для достижения поставленной цели, заключаются в следующем:

1. Изучение закономерностей теплопередачи в изделие при плазменной поверхностной термообработке на токах прямой и обратной

полярности с целью формирования упрочненных слоев глубиной в 4 мм.

2. Изучение влияния плазменного поверхностного нагрева при работе на токах прямой и обратной полярности на особенности структурообразования в высоколегированных коррозионно-стойких сталях.
3. Установление взаимосвязи технологических параметров плазменной поверхностной термообработки и наплавки на токе обратной полярности с глубиной и твердостью упрочненного слоя.
4. Разработка мобильного оборудования для проведения плазменной наплавки и поверхностной термообработки.
5. Внедрение результатов работы применительно к изготовлению однокатковой опорной части свободного конца мостовой конструкции.

***Научная новизна работы:***

На основе изучения особенностей теплопередачи в изделие при плазменной обработке на токах прямой и обратной полярности определены условия формирования закаленных 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 плазмотрона 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 изделие при работе плазмотрона на токе обратной полярности за счет

изменения площади зоны блуждания катодных пятен(зоны катодной очистки).

3. Теоретически 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, а изделие целиком механической обработки.

***Практическая значимость работы:***

1. 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
2. Разработано оборудование для реализации процесса плазменной поверхностной обработки и наплавки на токах прямой и обратной полярности.

3. Осуществлено внедрение технологического процесса плазменной поверхностной обработки при изготовлении деталей однокатковой опорной части свободного конца мостовой конструкции.

## 2. Особенности тепловых процессов при работе плазмотрона на токе прямой и обратной полярности

### 2.1. Тепловые процессы при плазменном нагреве.

Процессы поверхностного упрочнения требуют применения концентрированного источника нагрева с плотностью теплового потока на поверхности материала  $10^3 - 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>.

Нагрев поверхности материала плазменной дугой осуществляется за счет вынужденного конвективного ( $q_k$ ) и лучистого теплообмена ( $q_l$ ), и электронного тока ( $q_e$ ) [36]:

$$q = q_k + q_l + q_e \quad (2.1)$$

Для приближенных расчетов тепловых потоков в поверхности используется модель лучистого и конвективного теплообмена, основанная на теории пограничного слоя [73], Плотность конвективного теплового потока определяется из выражения:

$$g_k = \sum \lambda \frac{\partial T}{\partial y} + \sum \rho v H + \rho \sum K_T v \quad (2.2)$$

где:  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $H$  – энтальпия единицы массы;  $K_T$  – термодиффузионный коэффициент;  $y$  – координата, нормальная к обрабатываемой поверхности.

В общем виде конвективный нагрев поверхности обусловлен переносом энергии плазменной дуги под действием теплопроводности, диффузии. На практике используют более простое выражение [36, 73]:

$$q_k = a(T_{\text{плаз}} - T_{\text{пов}}) \quad (2.3)$$

где:  $a$  – коэффициент теплопередачи;  $T_{\text{плаз}}$  – температура плазменной дуги на внешней границе пограничного слоя;  $T_{\text{пов}}$  – температура поверхности.

Связь между  $a$  и параметрами плазменной дуги выражается через критериальные зависимости (число Нуссельта, Прандля, Рейнольдса и т.д.) [73].

Считается [74], что доля лучистого переноса энергии от плазменной струи к поверхности металла составляет 2-8% от общего баланса энергии. В случае использования импульсной дуги доля лучистого теплообмена

возрастает до 20-30%. Лучистый поток к единице площади поверхности в нормальном направлении определяется следующим образом [75]

$$q_l = \xi_1 \xi_2 * \sigma_c T^4 \quad (2.4)$$

где  $\xi_1$  - интегральная поглотительная способность поверхности,  $\xi_2$  - степень черноты плазмы,  $\sigma_c$  - постоянная Стефана-Больцмана,  $T$  - температура плазмы

Ряд исследователей предполагает, что теплообмен между дугой и поверхностью в основном определяется конвективной составляющей теплового потока [36,72-74].

Эффективный КПД плазменно-дугового нагрева может достигать 70÷85 % [4,5].

При использовании плазменной дуги, как источника тепловой энергии, наибольший интерес представляет распределение теплового потока по пятну нагрева. Распределение теплового потока  $q_z$  в пятне нагрева, при работе плазматрона на токе прямой полярности, приближенно описывается законом нормального распределения Гаусса [68]

$$q_z = q_{2m} \exp(-Kr^2) \quad (2.5)$$

где:  $K$  - коэффициент сосредоточенности, характеризующий форму кривой нормального распределения, а следовательно концентрацию энергии в пятне нагрева;  $q_{2m}$  - максимальный тепловой поток.

Коэффициент сосредоточенности играет большое значение в процессах плазменного упрочнения, т.к. - регулирует скорость нагрева поверхностного слоя металла, однако его определение достаточно сложная задача.

Максимальное значение теплового потока в центре пятна нагрева связана с коэффициентом сосредоточенности выражением [68]:

$$q_{max} = q_{2m} \frac{\pi}{K} \quad (2.6)$$

Теплообмен между плазменной струей и упрочняемой поверхностью происходит в области пятна нагрева, условный диаметр которого равен:

$$d_n = \frac{3.46}{\sqrt{K}} \quad (2.7)$$

На границе этого пятна нагрева удельный тепловой поток составляет 0.05 % от максимального  $q_{2m}$  [68].

Параметры режима работы плазмотрона оказывают сильное влияние на коэффициент сосредоточенности. С увеличением силы тока  $K$  возрастает. Уменьшение диаметра сопла увеличивает  $K$ . С увеличением расхода плазмообразующего газа коэффициент сосредоточенности имеет максимум. На коэффициент сосредоточенности оказывает большое влияние способ подачи газа, геометрия сопла и электрода.

Уравнение процесса распространения тепла в массивном полубесконечном теле от мощного быстродвижущегося нормально-распределенного источника нагрева, каким является плазменная дуга, имеет вид [8,68]

$$T(y, z, t) = T_0 + \frac{Q}{2\pi\lambda v} \frac{\exp\left(-\frac{z^2}{4at}\right)}{\sqrt{t(t_0+t)}} \quad (2.8)$$

где  $T$  - температура нагрева;  $y, z$  - ширина и глубина пятна нагрева;  $t$  - время;  $T_0$  - температура тела;  $Q$  - эффективная мощность плазменной дуги;  $\lambda, a$  - коэффициенты теплопроводности и температуропроводности;  $v$  - скорость перемещения источника теплоты.

При действии на поверхность полубесконечного тела теплового источника движущегося вдоль оси  $X$ , следует различать медленнодвижущийся, быстродвижущийся и импульсный источники тепла. Первый случай имеет место тогда, когда теплонасыщение успевает произойти раньше, чем пятно нагрева пройдет расстояние, равное радиусу пятна нагрева. При этом максимальная температура нагрева материала находится в центре пятна нагрева. По мере увеличения скорости перемещения теплового источника максимум температуры сдвигается к краю нагрева, в сторону, противоположную направлению перемещения теплового источника. Если тепловой источник движется с постоянной скоростью, то через определенный промежуток времени температурное поле вокруг движущегося источника стабилизируется. При упрочнении импульсной

плазменной дугой, время распространения теплового потока соизмеримо со временем воздействия плазменной дуги на материал. В реальных условиях после прекращения действия теплового источника происходит выравнивание температуры. При этом в начальный момент времени, после прекращения действия происходит продвижение изотермы с фиксированной температурой вглубь материала и после достижения определенной глубины  $Z_{max}$  имеет место, обратное перемещению данной изотермы [44,68].

Мощность в пятне нагрева  $W$  выражается по следующей зависимости:

$$W = \frac{4Qt}{\pi d^2} \quad (2.9)$$

где  $Q$  - эффективная тепловая мощность плазменной дуги;  $t$  - длительность нагрева;  $d$  - диаметр пятна нагрева.

В случае упрочнения без оплавления поверхности, необходимо, чтобы  $T_{max}$  на поверхности материала не превышала температуру плавления

$$T_{max} \leq T_{пл} \quad (2.10)$$

При разработке технологических процессов на практике необходимо иметь простые и удобные аналитические выражения для расчета основных параметров упрочнения. В работах по плазменному упрочнению [76 - 79] используются различные аналитические выражения. Так в работе [79] скорость нагрева локальной зоны определяется из выражения:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{q_s \sqrt{\alpha}}{\lambda \sqrt{t}} \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-\frac{h^2}{4at}} \quad (2.11)$$

где:  $q_s$  - плотность мощности плазменной дуги;  $\alpha$ ,  $\lambda$  - коэффициенты температуропроводности и теплопроводности;  $t$  - время воздействия;  $h$  - глубина упрочнения.

Значение мощности плазменной дуги достаточной для фазовых превращений определяют:

$$q_s = \frac{\sqrt{\pi} T_{зак} B}{2\sqrt{t}} \quad (2.12)$$

где:  $T_{зак}$  - температура закалки;  $B$  - коэффициент аккумуляции теплоты.

Скорость обработки определяется как:

$$v = \frac{8\alpha V \Delta T^3}{\pi (T_c + \Delta T)^2 \sqrt{h^3}} \quad (2.13)$$

В работе [77] предлагается использовать зависимость глубины закалки от параметра

$$h = \frac{P}{(d_c v)^{0.4}} \quad (2.14)$$

где:  $P$  - тепловая мощность источника нагрева;  $d$  - диаметр сопла;  $v$  - скорость обработки.

Проведенные авторами [76 - 79] экспериментальные исследования процесса плазменного упрочнения сталей 9ХФ, 40Х, У8, Х12М, показали, что максимальная поверхностная твердость после упрочнения пропорциональна величине углеродного эквивалента  $C_{экр}$ , а глубина упрочнения зависит от коэффициента температуропроводности. Это позволило авторам установить зависимость вида:

$$HV_{max} = f(q, v, C_{экр}); h = (q, v, a) \quad (2.15)$$

Полученные результаты, по мнению авторов, свидетельствуют о хорошем совпадении экспериментальных и расчетных данных, что позволяет, не проводя экспериментов, прогнозировать максимальную твердость и глубину упрочненных поверхностей.

Построение математических моделей плазменного поверхностного упрочнения, отражающих кинетику процесса, основано на решении нелинейных краевых задач теории теплопроводности. Математическая постановка такой задачи сводится к определению температурных полей в поверхностном слое детали и к расчету границ раздела при полиморфных превращениях. Аналитическое решение возможно только при ряде упрощений.

## **2.2. Сравнение тепловой обстановки на поверхности изделия при работе плазмотрона на токах прямой и обратной полярности.**

Целью данного эксперимента являлось изучение особенностей распределения энергии сжатой дуги при плазменной обработке материалов, а также получение данных о зависимости теплопередачи в изделие от параметров процесса при работе плазмотрона на прямой и обратной полярности.

### **2.2.1. Исследование теплопередачи в изделие при работе плазмотрона токах прямой и обратной полярности.**

#### **2.2.1.1 Методика проведения эксперимента.**

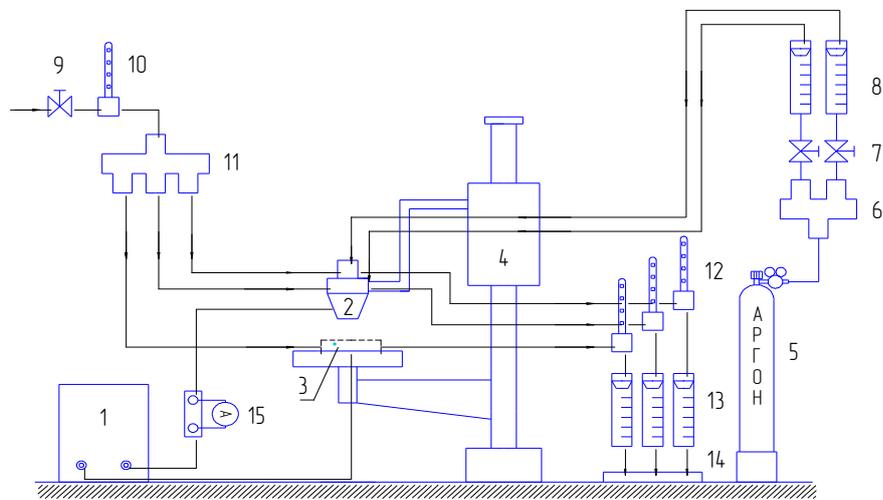
Работа проводилась в два этапа. На первом этапе производились исследования тепловых характеристик плазмотрона, а на втором, исследования технологических возможностей плазменной закалки.

Оценка тепловой нагрузки на плазмотрон и теплоотдачи в изделие проводилась методом калориметрирования. Зная расход воды через охлаждаемый элемент и изменение её температуры, можно определить тепловложение в элемент:

$$P_B = c \cdot S \cdot \Delta T, \quad (2.24)$$

где  $P_B$  – отводимая мощность, Вт;  $c$  – теплоёмкость воды, Дж/кг·град (4190);  $S$  – расход воды, кг/с;  $\Delta T$  – разность температур на выходе и входе в соответствующий элемент ( $\Delta T = T_{\text{вых}} - T_{\text{вх}}$ ).

Измерение тепловых характеристик плазмотрона проводились на стенде, собранном на базе универсального наплавочного станка (рис. 2.4). Имитатором изделия служила медная водоохлаждаемая пластина. Охлаждение плазматронов и изделия производилось посредством воды, подведенной к установке. Подача плазмообразующего и защитного газов осуществлялась через газовый коллектор из баллона с аргоном. Для питания сжатой дуги сварочным током использовался инверторный источник питания ВД-306 «Строитель».



*Рис. 2.4. Схема экспериментальной установки.*

*1 – источник питания; 2 – плазматрон; 3 – изделие; 4 – сварочный манипулятор; 5 – баллон с аргоном; 6 – коллектор газовый; 7 – вентиль газовый; 8 – ротаметр газовый; 9 – вентиль водяной; 10, 12 – термометр ртутный; 11 – коллектор водяной; 13 – ротаметр водяной; 14 – слив; 15 – амперметр.*

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.

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). На рис. 2.5. показана схема подключения вольтметров. Электрод плазматрона, для работы на прямой полярности, изготовлен в виде медной державки с заделанным в неё стержнем вольфрама, а для работы на обратной полярности использован комбинированный электрод: заподлицо с медным электродом запрессован вольфрамовый стержень.

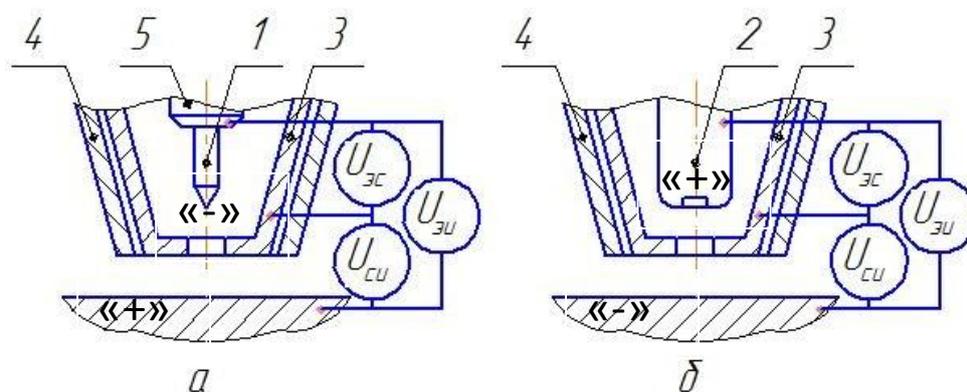


Рис. 2.5. Схема измерения напряжения при работе на: а – прямой полярности, б – обратной полярности; 1 – вольфрамовый электрод-катод, 2 – электрод анод с вольфрамовой вставкой; 3 – плазмообразующее сопло; 4 – защитное сопло; 5 – медная державка.

### 2.2.1.2 Порядок проведения эксперимента

Задачами эксперимента являются:

- исследование зависимости теплопередачи в изделие при изменении геометрических параметров плазмотрона и параметров режима плазменной поверхностной термообработки
- сравнительный анализ теплопередачи в изделие при работе плазмотрона на токах прямой и обратной полярности.

Исследования проводились на базе универсального плазмотрона, обеспечивающего стабильную работу на токах прямой и обратной полярности. Измерялись расход и температура охлаждающей жидкости на выходе из каналов охлаждения плазмотрона и имитатора изделия. При этом учитывалась температура охлаждающей жидкости на входе.

При подборе режимов плазменной поверхностной закалки проводился дополнительный эксперимент заключающийся в следующем:

Исходя из возможностей плазмотрона и характеристик манипулятора универсального наплавочного станка были выбраны диапазоны изменения силы тока дуги ( $90 < I_{св} < 250$  А шаг 50А) и скоростей обработки ( $5 < V_{св} < 20$  м/ч), для упрощения эксперимента расходы плазмообразующего и защитного газов оставались постоянными независимо от изменения остальных параметров процесса. Сначала на изделии проводилась серия опытов на теоретически выбранных режимах. Далее было проведено

металлографическое исследование обработанных поверхностей с целью подтверждения структурных изменений соответствующих закалочным процессам. Металлографическое исследование в свою очередь помимо подтверждения наличия структурных изменений показало необходимость корректировки выбранных режимов. После проводилась корректировка режимов обработки до получения ровного и четкого отпечатка либо валика (для случая обработки с оплавлением поверхности). Далее происходило изготовление образцов для металлографического исследования и подготовка макро- и микрошлифов из образцов и оценка результатов процесса обработки.

### 2.2.1.3. Исследование энергетических характеристик сжатой дуги.

Распределение теплового потока сжатой дуги определяет эффективность плазменных процессов и работоспособность плазмотрона. Распределение тепловой нагрузки между электродом и плазмообразующим соплом неравномерное и сильно зависит от полярности тока.

Мощность сжатой дуги  $N_{\delta}$  определяется технологическими параметрами процесса: током дуги  $I_{\delta}$ , напряжением  $U_{\delta}$ . В свою очередь напряжение дуги  $U_{\delta}$  определяется: составом и расходом плазмообразующего газа  $G_n$ , способом подачи плазмообразующего газа, расстоянием от электрода до изделия  $h_{эи}$ , полярностью, а также геометрическими параметрами плазмотрона (рис. 2.12): вылетом электрода из цанги  $l_э$ , диаметром плазмообразующего сопла  $d_c$ , высотой канала сопла  $h_c$ , расстоянием от конца электрода до плазмообразующего сопла  $h_{эс}$ , размерами и формой плазмообразующей камеры.

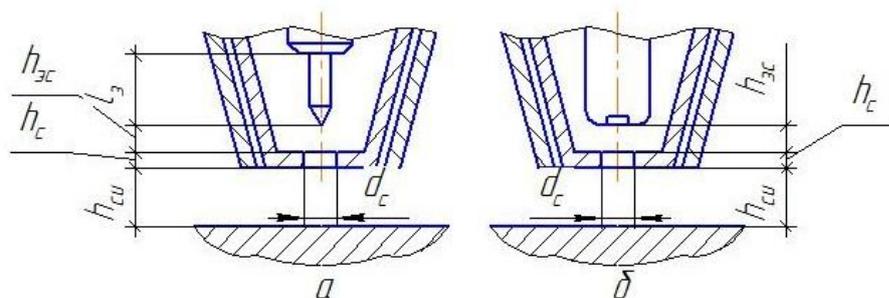


Рис. 2.6. Конструктивные параметры плазмотрона для работы на прямой полярности (а); на обратной (б).

Тепловложение в электрод плазмотрона и изделие определяется приэлектродными процессами и теплопередачей от сжатой дуги, а в плазмообразующее сопло – теплопередачей от части сжатой дуги, расположенной внутри плазмотрона [80].

Замеры проводились в соответствии с параметрами, приведёнными в табл. 2.1.

Результаты замеров напряжений на сжатой дуге  $U_d$  (на участке электрод-изделие  $U_{эи}$ ), внутрисоплового участка  $U_{эс}$ , засоплового участка  $U_{си}$ , температур охлаждающей воды в магистрали  $T_{маг}$ , на выходах с изделия  $T_{изд}$  и плазмотрона  $T_{пл}$ , а также, расходы воды на изделии  $S_{изд}$  и на плазмотроне  $S_{пл}$  представлены в табл. 2.2.

Таблица 2.1.  
Таблица параметров

Полярность	Расстояние от среза сопла до изделия, мм	Расходы плазмообразующего и защитного газов, л/мин	d сопла, мм	$I_{св}$ , А
Прямая	5	1,7; 3,6	4	100, 200, 250
			6	
Обратная	5	2,1; 4	4	100, 200, 250
			6	

Таблица 2.2.  
Результаты измерений

Полярность тока	$T_{маг}$ , °С	$S_{пл}$ , л/мин	$S_{изд}$ , л/мин	d сопла, мм	$T_{изд}$ , °С	$T_{пл}$ , °С	$I_d$ , А	$U_{эи}$ , В	$U_{эс}$ , В	$U_{си}$ , В
прямая	16	1,2	2,4	4	24	23,5	100	19,8	6,2	13,8
					31	29	200	20,5	7,1	13,5
					32	34	250	21,4	7,3	14,1
				6	28	24	100	22	8	13,5
					37	32	200	23,8	8,8	15
					47	42	250	24	8,2	15,8
обратная	14	1,7	2,8	4	27	27	100	35	19,1	16,3
					34	31	200	37	20	17
					40	40,5	220	38	22	16
				6	30	30,5	100	32	17	16
					32	33	200	32	17	16
					48	40	250	32,5	17	15,5

$T_{маг}$  – температура воды в магистрали;  $T_{изд}$  – температура воды на выходе из изделия;  $T_{пл}$  – температура воды на выходе из плазматрона;  $S_{пл}$ ,  $S_{изд}$  – расходы воды на охлаждение плазматрона и изделия;  $I_{д}$  – ток дуги;  $U_{эс}$  – падение напряжения на участке электрод-сопло;  $U_{си}$  – падение напряжения на участке сопло-изделие;  $U_{зи}$  – падение напряжения на участке электрод-изделие.

Далее были проведены расчёты мощности сжатой дуги, мощности передаваемой плазматрону и мощности передаваемой обрабатываемому изделию, а также тепловложений в плазматрон и изделие. Полученные в результате расчётов значения приведены в табл. 2.3.

Таблица 2.3.

Тепловложение и электрическая мощность вводимые в плазматрон и изделие при работе на токах прямой и обратной полярности.

Полярность тока	d сопла, мм	$I_{д}$ , А	$P_{и}$ , кДж	$P_{пл}$ , кДж	$N_{и}$ , кВт	$N_{пл}$ , кВт	$N_{д}$ , кВт
прямая	4	100	1,312	0,683	1,360	0,620	1,980
		200	2,537	1,223	2,680	1,420	4,1
		250	2,362	1,709	3,525	1,825	5,350
	6	100	1,400	0,720	1,350	0,850	2,200
		200	1,668	1,360	2,250	1,320	3,570
		250	2,426	2,160	3,160	1,640	4,800
обратная	4	100	2,319	1,045	1,590	1,910	3,500
		200	3,587	1,921	2,720	3,200	5,920
		220	4,913	3,129	3,520	4,840	8,360
	6	100	2,7	1,347	1,740	1,460	3,290
		200	4,1	2,655	2,800	3,400	6,400
		250	7,3	3,520	3,875	4,250	8,125

$d_c$  – диаметр плазмообразующего сопла плазматрона;  $I_{д}$  – ток дуги;  $P_{и}$  – тепловложение в изделие;  $P_{пл}$  – тепловложение в плазматрон;  $N_{и}$  – электрическая мощность передаваемая изделию;  $N_{пл}$  – электрическая мощность передаваемая плазматрону;  $N_{д}$  – электрическая мощность дуги.

Проведенные исследования показали, что при работе плазматрона на обратной полярности напряжение на дуге  $U_{д}$  значительно выше, чем на прямой (см. табл. 2.4), и находится в пределах  $U_{д\text{ об}} \approx (1,1-1,5) U_{д\text{ пр}}$  (где  $U_{д\text{ об}}$  – падение напряжения на сжатой дуге при работе плазматрона на обратной полярности;  $U_{д\text{ пр}}$  – падение напряжения на сжатой дуге при работе плазматрона на прямой полярности), следовательно суммарная мощность дуги выше.

Таблица 2.4.

Падение напряжения на различных участках сжатой дуги при работе плазмотрона на прямой и обратной полярности

Параметры	Полярность	
	Обратная	Прямая
$d_c=3\text{мм}; h_{эс}=1\text{мм}; I_{\partial}=50-180\text{А}; G_n=4,7\text{ л/мин};$	$u_{\partial}=36-54\text{В};$ $u_{эс}=20-31\text{В};$ $u_{сu}=16-22\text{В}.$	$u_{\partial}=34-37\text{В};$ $u_{эс}=7-8\text{В};$ $u_{сu}=26-28\text{В}.$
$d_c=3\text{мм}; h_{эс}=1\text{мм}; I_{\partial}=50-180\text{А}; G_n=1,4\text{ л/мин};$	$u_{\partial}=29-35\text{В};$ $u_{эс}=16-21\text{В};$ $u_{сu}=12-15\text{В}.$	$u_{\partial}=30-29\text{В};$ $u_{эс}=5-9\text{В};$ $u_{сu}=24-19\text{В}.$
$d_c=3\text{мм}; h_{эс}=3\text{мм}; I_{\partial}=50-180\text{А}; G_n=4,7\text{ л/мин};$	$u_{\partial}=40-54\text{В};$ $u_{эс}=21-30\text{В};$ $u_{сu}=19-24\text{В}.$	$u_{\partial}=33-35\text{В};$ $u_{эс}=8-10\text{В};$ $u_{сu}=25\text{В}.$
$d_c=3\text{мм}; h_{эс}=3\text{мм}; I_{\partial}=50-180\text{А}; G_n=1,4\text{ л/мин};$	$u_{\partial}=34-42\text{В};$ $u_{эс}=18-24\text{В};$ $u_{сu}=16-17\text{В}.$	$u_{\partial}=32\text{В};$ $u_{эс}=6-8\text{В};$ $u_{сu}=25-23\text{В}.$
$d_c=3\text{мм}; h_{эс}=5\text{мм}; I_{\partial}=50-180\text{А}; G_n=4,7\text{ л/мин};$	$u_{\partial}=40-55\text{В};$ $u_{эс}=21-29\text{В};$ $u_{сu}=18-25\text{В}.$	$u_{\partial}=34-37\text{В};$ $u_{эс}=9-10\text{В};$ $u_{сu}=26-27\text{В}.$
$d_c=3\text{мм}; h_{эс}=5\text{мм}; I_{\partial}=50-180\text{А}; G_n=1,4\text{ л/мин};$	$u_{\partial}=36-44\text{В};$ $u_{эс}=19-27\text{В};$ $u_{сu}=15-16\text{В}.$	$u_{\partial}=30-33\text{В};$ $u_{эс}=7-9\text{В};$ $u_{сu}=22-24\text{В}.$
$d_c=6\text{мм}; h_{эс}=1\text{мм}; I_{\partial}=50-250\text{А}; G_n=4,7\text{ л/мин};$	$u_{\partial}=28-34\text{В};$ $u_{эс}=13-18\text{В};$ $u_{сu}=15-16\text{В}.$	$u_{\partial}=21-26\text{В};$ $u_{эс}=5-8\text{В};$ $u_{сu}=15-18\text{В}.$
$d_c=6\text{мм}; h_{эс}=1\text{мм}; I_{\partial}=50-250\text{А}; G_n=1,4\text{ л/мин};$	$u_{\partial}=27-30\text{В};$ $u_{эс}=14-16\text{В};$ $u_{сu}=12-14\text{В}.$	$u_{\partial}=20-26\text{В};$ $u_{эс}=5-6\text{В};$ $u_{сu}=14-20\text{В}.$
$d_c=3\text{мм}; h_{эс}=3\text{мм}; I_{\partial}=50-250\text{А}; G_n=4,7\text{ л/мин};$	$u_{\partial}=28-37\text{В};$ $u_{эс}=15-20\text{В};$ $u_{сu}=14-16\text{В}.$	$u_{\partial}=24-27\text{В};$ $u_{эс}=6-9\text{В};$ $u_{сu}=17-18\text{В}.$
$d_c=6\text{мм}; h_{эс}=3\text{мм}; I_{\partial}=50-250\text{А}; G_n=1,4\text{ л/мин};$	$u_{\partial}=26-34\text{В};$ $u_{эс}=14-17\text{В};$ $u_{сu}=12-17\text{В}.$	$u_{\partial}=21-27\text{В};$ $u_{эс}=5-7\text{В};$ $u_{сu}=16-20\text{В}.$
$d_c=6\text{мм}; h_{эс}=5\text{мм}; I_{\partial}=50-250\text{А}; G_n=4,7\text{ л/мин};$	$u_{\partial}=30-39\text{В};$ $u_{эс}=17-27\text{В};$ $u_{сu}=14-17\text{В}.$	$u_{\partial}=26-30\text{В};$ $u_{эс}=7-10\text{В};$ $u_{сu}=18-20\text{В}.$
$d_c=6\text{мм}; h_{эс}=5\text{мм}; I_{\partial}=50-250\text{А}; G_n=1,4\text{ л/мин};$	$u_{\partial}=28-34\text{В};$ $u_{эс}=16-19\text{В};$ $u_{сu}=13-15\text{В}.$	$u_{\partial}=23-29\text{В};$ $u_{эс}=5-9\text{В};$ $u_{сu}=18-20\text{В}.$

$d_c$  – диаметр плазмообразующего сопла плазмотрона;  $h_{эс}$  – расстояние от электрода до плазмообразующего сопла;  $I_{\partial}$  – ток дуги;  $G_n$  – расход плазмообразующего газа;  $u_{\partial}$  – напряжение дуги;  $u_{эс}$  – падение напряжения на участке электрод-сопло;  $u_{сu}$  – падение напряжения на участке сопло-изделие

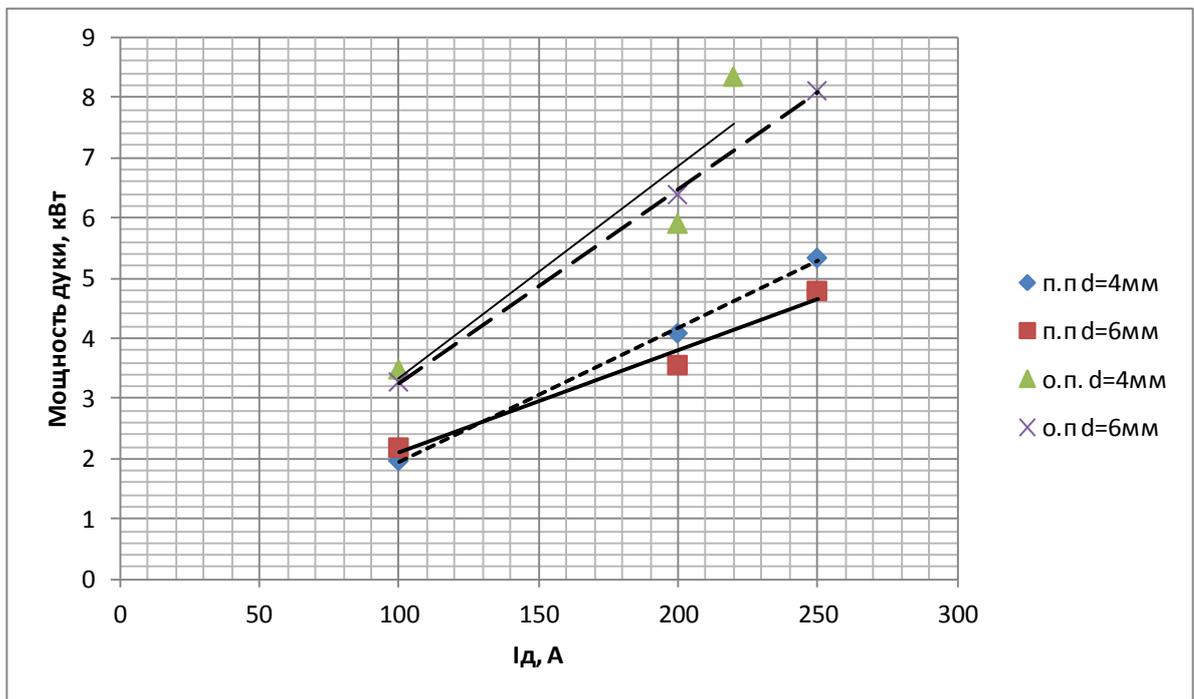


Рис. 2.7. Зависимость мощности сжатой дуги от силы тока при диаметрах плазмообразующего сопла  $d_c=4;6$  мм; расходах плазмообразующего газа  $G_n=1,7$  л/мин, защитного газа  $G_3=3,6$  л/мин – для прямой полярности; плазмообразующего газа  $G_n=2,1$  л/мин, защитного газа  $G_3=4$  л/мин – для обратной полярности.

Причем падение напряжения на различных участках сжатой дуги при работе на прямой и обратной полярности при прочих равных условиях сильно различаются: падение напряжения части столба дуги, расположенной внутри плазматрона при работе на обратной полярности значительно больше:  $U_{эс\ on} \approx (2-2,5) U_{эс\ m}$ , а падение напряжения на внешней части столба дуги, наоборот, больше при работе на прямой полярности:  $U_{cu\ m} \approx (1,1 - 1,8) U_{cu\ on}$ .

Зависимости изменения тепловложения в плазматрон  $Q_{nl}$  и изделие  $Q_u$  в зависимости от силы тока дуги при работе плазматрона на прямой и обратной полярности представлены на рис. 2.8, 2.9.

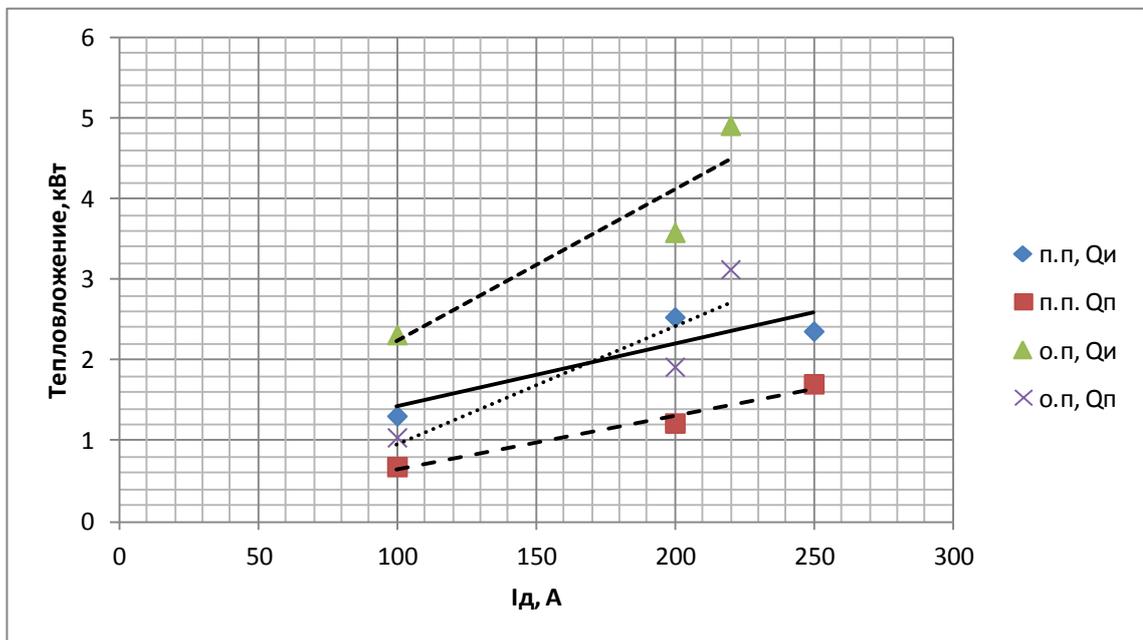


Рис. 2.8. Зависимость тепловложения в плазматрон и в изделие от силы тока сжатой дуги, при диаметре плазмообразующего сопла  $d_c=4\text{мм}$ ; расходах плазмообразующего газа  $G_n=1,7\text{ л/мин}$ , защитного газа  $G_3=3,6\text{ л/мин}$  – для прямой полярности; плазмообразующего газа  $G_n=2,1\text{ л/мин}$ , защитного газа  $G_3=4\text{ л/мин}$  – для обратной полярности

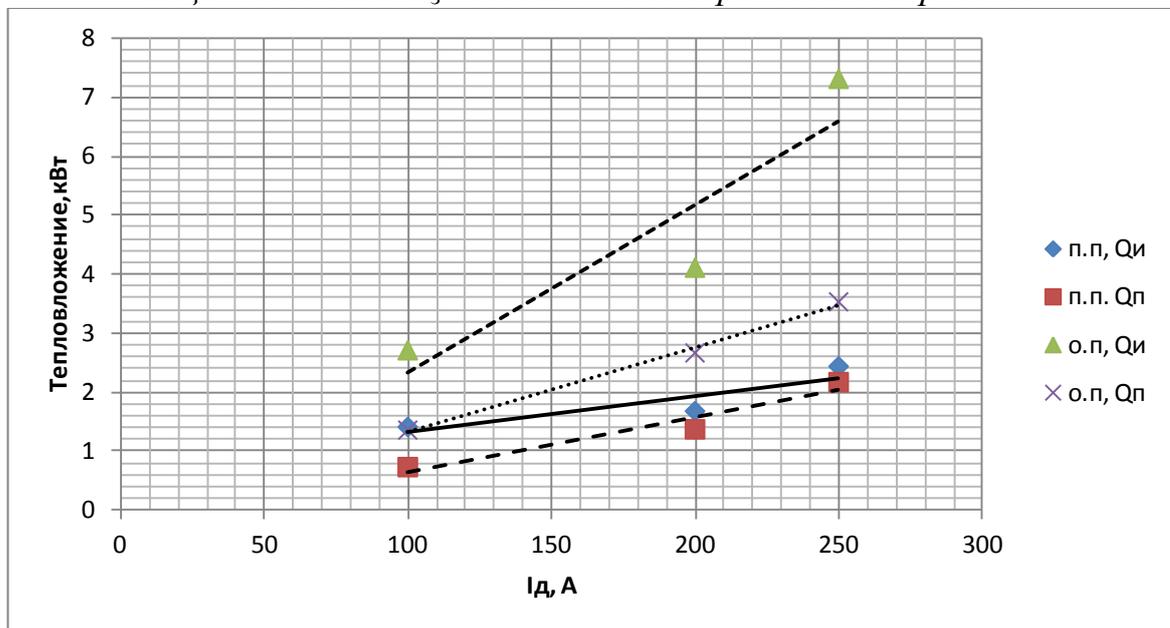


Рис. 2.9. Зависимость тепловложения в плазматрон и в изделие от силы тока сжатой дуги, при диаметре плазмообразующего сопла  $d_c=6\text{мм}$ ; расходах плазмообразующего газа  $G_n=1,7\text{ л/мин}$ , защитного газа  $G_3=3,6\text{ л/мин}$  – для прямой полярности; плазмообразующего газа  $G_n=2,1\text{ л/мин}$ , защитного газа  $G_3=4\text{ л/мин}$  – для обратной полярности

Проанализировав полученные результаты и изучив полученные зависимости можно сделать следующие выводы: при прочих равных условиях при работе плазматрона 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; при увеличении диаметра плазмообразующего сопла происходит падение напряжения засоплового участка столба дуги на 10 – 20% и внутрисоплового на 5 - 15%, что приводит к падению мощности сжатой дуги и уменьшению тепловложения в изделие и элементы плазмотрона, падение мощности сжатой дуги при увеличении диаметра плазмообразующего сопла плазмотрона связано с уменьшением напряжённости электрического поля на всех участках столба дуги.

### **Выводы по главе 2:**

1. Исследованы особенности распределения энергии сжатой дуги при плазменной поверхностной обработке материалов и получены зависимости теплопередачи в изделие от параметров процесса при работе плазмотрона на прямой и обратной полярности. Установлено, что при прочих равных условиях при работе плазмотрона на токе обратной полярности тепловложение в изделие в 1,2 – 1,5 раза выше чем на прямой.
2. Установлено, что величины падений напряжения на различных участках сжатой дуги при работе на прямой и обратной полярности при прочих равных условиях сильно различаются: падение напряжения части столба дуги, расположенной внутри плазматрона при работе на обратной полярности значительно больше:  $U_{эс\ on} \approx (2-2,5) U_{эс\ m}$ , а падение напряжения на внешней части столба дуги, наоборот, больше при работе на прямой полярности:  $U_{cu\ m} \approx (1,1 - 1,8) U_{cu\ on}$ .
3. Выявлено, что при схожих мощностях плазменной дуги суммарная тепловая нагрузка на плазмотрон, работающий на прямой полярности, находится в пределах 20 – 50% от мощности сжатой дуги, на обратной полярности 15 – 40%. Установлено, что при увеличении диаметра плазмообразующего сопла(от 4 до 6 мм) происходит снижение падения напряжения засоплового участка столба дуги на 10 – 20% и внутрисоплового на 5 - 15%, что приводит к падению мощности

сжатой дуги и уменьшению тепловложения в изделие и элементы плазмотрона.

### **3. Особенности распределения энергии сжатой дуги при работе плазмотрона на токе обратной полярности.**

Проведенные в главе 2 сравнительные исследования теплопередачи в изделие при работе плазмотрона на токах прямой и обратной полярности доказывают высокую эффективность применения плазменной дуги прямого действия обратной полярности. Установлено, что при прочих равных условиях тепловложение в изделие при работе на токе обратной полярности выше чем на прямой, благодаря этому возможно ведение процесса на более низких погонных энергиях по сравнению с прямой полярностью, но при одинаковой эффективности. В данной главе рассмотрено, с чем же связано такое расхождение и проведена корректировка математической модели плазменной поверхностной термообработки на токе обратной полярности.

#### **3.1 Влияние полярности и параметров процесса на теплопередачу в изделие**

Вопросам тепловложения в изделие при плазменной сварке, особенно при работе плазмотрона на прямой полярности, посвящено достаточное количество работ [9, 81 - 84]. Выявлены основные факторы, влияющие на эффективный КПД процесса  $\eta_u$ . При совпадении в качественной оценке влияния параметров режима на  $\eta_u$  результаты различных исследователей имеют значительное расхождение в количественных показателях. Это объясняется различием конструкций плазмотронов, разнообразием методик, оборудования и регистрирующих приборов для определения тепловложения в изделие, значительными отличиями условий проведения исследований (диапазон мощности сжатой дуги, степень обжатия дуги, технологические особенности и др.). Определенный способ плазменной обработки металлов предъявляет специфические требования к параметрам сжатой дуги, которые задаются конструкцией плазмотрона и параметрами режима процесса.

Как уже было отмечено ранее, при одинаковом токе и прочих равных условиях тепловложение в изделие выше при работе плазмотрона на обратной полярности, чем на прямой  $P_{uon} = (1,3 - 1,6)P_{unn}$ , что объясняется более высоким напряжением на дуге (табл. 3.1). Измерение величины

напряжения проводилось согласно методики описанной в п. 2.3.2 и схеме, представленной на рис. 2.9., позволяющей замерить напряжение сжатой дуги  $u_d$  и падение напряжения на ее участках: – электрод – сопло  $u_{эс}$ , и сопло – изделие  $u_{си}$ . Результаты измерений приведены в таблице 2.4. В качестве основных факторов были выбраны технологические параметры –  $I_d$  – сила тока,  $G_n$  – расход плазмообразующего газа и геометрические параметры –  $d_c$  – диаметр сопла и  $h_{эс}$  – расстояние от электрода до сопла.

При работе плазмотрона на токе прямой полярности, распределение мощности по пятну нагрева подчиняется закону нормального распределения Гаусса. При таком распределении максимальная мощность сосредоточена в центре пятна нагрева и при достаточных значениях тока дуги вызывает подплавление обрабатываемой поверхности, что не всегда необходимо. Зона контакта дуги с обрабатываемой поверхностью при работе плазмотрона на токе прямой полярности представляет собой анодное пятно, размеры которого определяются диаметром плазмообразующего сопла плазмотрона.

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 катодными пятнами блуждающими по его поверхности. Одной из отличительных особенностей нестационарных пятен является кратковременность их существования и большая плотность тока в них ( $j \sim 10^5 - 10^6 \text{ A/cm}^2$ ) при этом 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 [85].

В работе предлагается принять во внимание, что теплопередача в изделие в зависимости от полярности определяется приэлектродными процессами и передачей тепла плазменным потоком, и может быть представлена в виде:

$$P_k = I_{\partial}(u_k - \varphi_e) + P_n \quad (3.1)$$

$$P_a = I_{\partial}(u_a + \varphi_e) + P_n \quad (3.2)$$

где:  $I_{\partial}$  – ток дуги;  $u_k$  – катодное падение напряжения;  $u_a$  – анодное падение напряжения;  $\varphi_e$  – работа выхода;  $P_n$  – мощность, передаваемая изделию плазменным потоком.

Процессы, происходящие в приэлектродных областях, до сих пор являются мало изученными. Считается [51,86 - 89], что катодное падение напряжения для различных металлов находится в пределах  $u_k = 5 - 12$  В, а анодное – не зависит от материала анода и находится в пределах  $u_a = 5 - 6$  В. При этом стоит отметить, что выражение 3.1 справедливо лишь для термокатода.

Для оценки величины мощности передаваемой изделию потоком плазмы  $P_n$  для работы плазматрона на прямой и обратной полярности и влияния технологических параметров ( $I_{\partial}$ ,  $d_c$ ,  $G_n$ ) можно сделать следующие допущения. При определении  $P_n$  для работы на прямой полярности слагаемое  $I_{\partial} \cdot (u_a + \varphi_e)$  можно взять из результатов экспериментов по определению тепловложения в анод плазматрона при работе на обратной полярности (табл. 3.2) воспользовавшись методикой изложенной в гл. 2.

Целью эксперимента являлось получение данных о зависимости напряжения сжатой дуги от параметров процесса при работе плазматрона на прямой и обратной полярности, и исследование изменения катодного и анодного падений напряжений в зависимости от материала катода и анода, а также оценка влияния полярности на тепловые нагрузки плазматрона и теплоотдачу в изделие. В качестве основных факторов были выбраны технологические параметры:  $I_{\partial}$  – сила тока,  $G_n$  – расход плазмообразующего газа и геометрические параметры:  $d_c$  – диаметр сопла и  $h_{эс}$  – расстояние от электрода до сопла.

С целью получения достоверных и наиболее точных данных была использована комбинация схем(рис. 3.1) и методика проведения эксперимента предлагаемая в работе [90]:

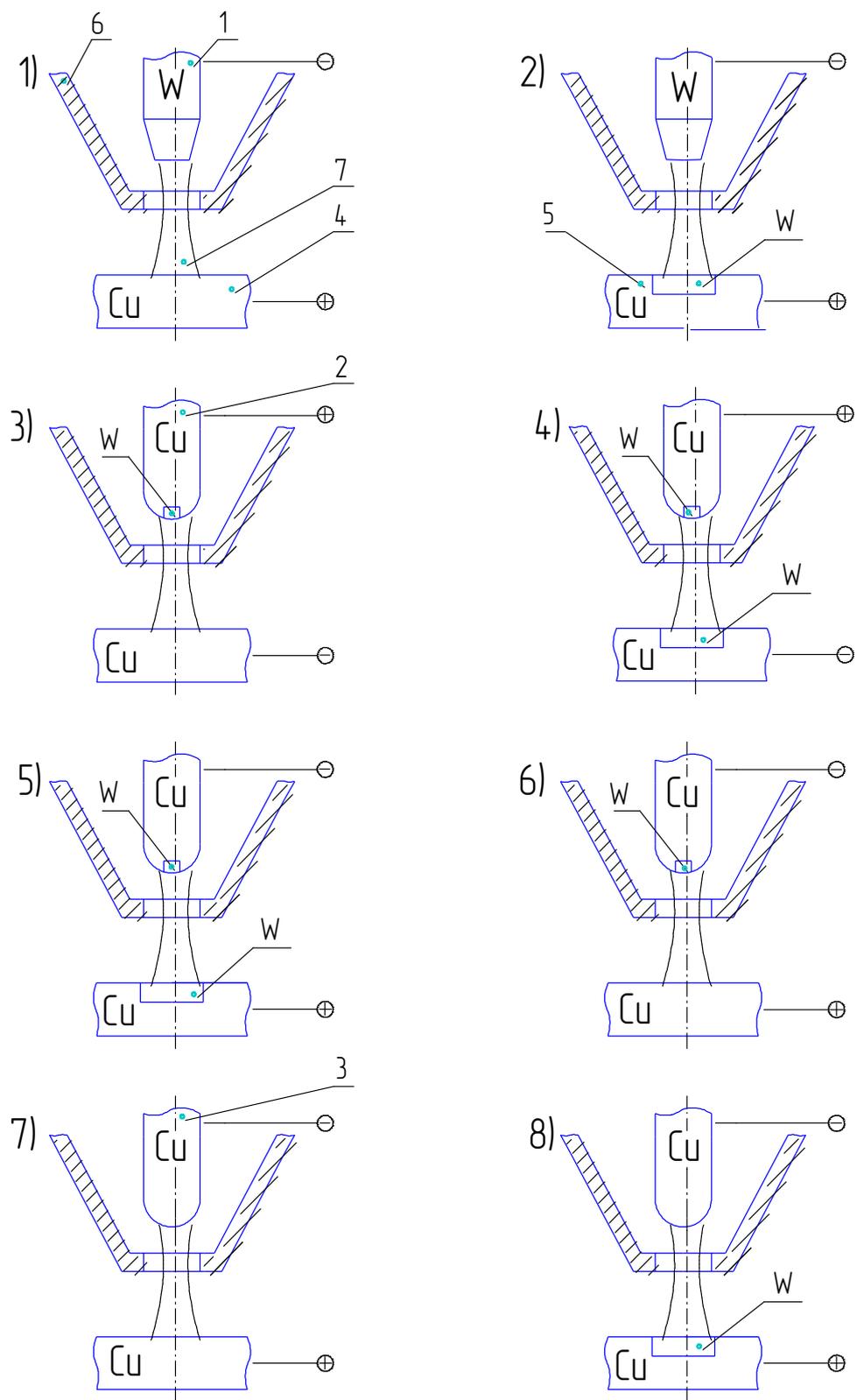


Рис. 3.1. Комбинация и последовательность схем проведения экспериментов: 1 – вольфрамовый катод; 2 – медный анод с вольфрамовой вставкой; 3 – медный катод; 4 – медный имитатор изделия; 5 – медный имитатор изделия с вольфрамовой вставкой; 6 – плазмообразующее сопло; 7 – сжатая дуга.

Измерения проводились согласно схеме, представленной на рис. 3.1, позволяющей замерить падение напряжения сжатой дуги  $U_{\partial}$  и падение напряжения на ее участках: электрод – сопло  $U_{эс}$  и сопло – изделие  $U_{си}$ . Результаты измерений падений напряжений на сжатой дуге  $U_{\partial}$  и ее участках  $U_{эс}$  и  $U_{си}$  и рассчитанные по методике описанной в главе 2 мощности и работе приведены в таблице 2.4.

Падение напряжения на различных участках сжатой дуги при прочих равных условиях ( $d_c = 5$  мм,  $h_c = 3,5$  мм,  $h_{си} = 5$  мм) различаются: падение напряжения на части столба дуги, расположенной внутри плазматрона больше при работе схем № 5 и № 6 с комбинированным электродом (рис. 3.1), снабженным вольфрамовой вставкой:  $U_{эс\ 5-6} \approx (1,4-1,7) U_{эс\ 1-2}$ , а падение напряжения на внешней части столба дуги, наоборот, больше при работе схем № 1 и № 2 с вольфрамовым электродом:  $U_{си\ 1-2} \approx (1,1-1,25) U_{си\ 5-6}$ . Причем различие падений напряжений на участке дуги, расположенного внутри плазматрона может быть объяснено следующими причинами: 1) за счет изменения характеристик вихревого потока плазмообразующего газа при изменении геометрии вихревой (плазмообразующей) камеры плазматрона ввиду разных размеров электродов; 2) ввиду изменения катодного падения напряжения  $U_k$ .

При развитой поверхности катода, как в нашем случае при использовании комбинированного электрода, зона контакта дуги с катодом представляет собой совокупность достаточно большого числа относительно малых по размеру, но разрозненных нестационарных пятен различного типа, 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 катода (по вольфрамовой вставке). Блуждая, дуга привязывается к краям вольфрамовой вставки, подплавляя медь. При этом нет стабильного катодного пятна, поэтому требуются дополнительные затраты энергии на эмиссию электронов по сравнению с работой

заточенного вольфрамового катода (схема №1 и №2), что вызывает увеличение катодного падения напряжения[85].

Снижение катодного падения напряжения  $U_k$  при работе схемы №4, по сравнению со схемой №3, может быть объяснено эмиссионными свойствами: поскольку эмиссионные свойства вольфрама выше, чем у меди, поэтому меньшее значение катодное падение напряжения.

В отличие от катодного падения напряжений, которое зависит от материала катода и может изменяться от 5 до 12 В, анодное падение напряжений, как считает целый ряд исследователей [4,6,85,90], не зависит от материала анода и есть величина постоянная  $U_a \approx const$ . Для проведения исследований в данном направлении к комбинации схем была добавлена еще одна схема №9 для работы на обратной полярности с медным электродом-анодом и медным имитатором изделия с вольфрамовым керном (рис. 3.2).

Для исследования изменения анодного падения напряжения в зависимости от материала анода были выбраны следующие комбинации схем: 1) схемы №4 и №9, где в схеме №4 используется комбинированный электрод-анод, снабженный вольфрамовой вставкой, а в схеме №9 – медный электрод-анод; имитатором изделия в обоих случаях служит медная пластина с вольфрамовым керном; 2) схемы №1 и №2 с одинаковыми вольфрамовыми электродами-катодами, но в схеме №1 в качестве имитатора изделия служит медная пластина, а в схеме №2 – медная пластина с вольфрамовым керном.

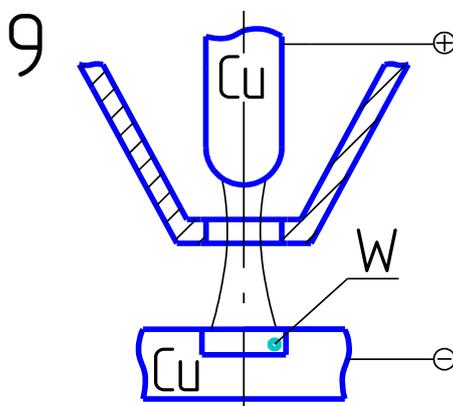
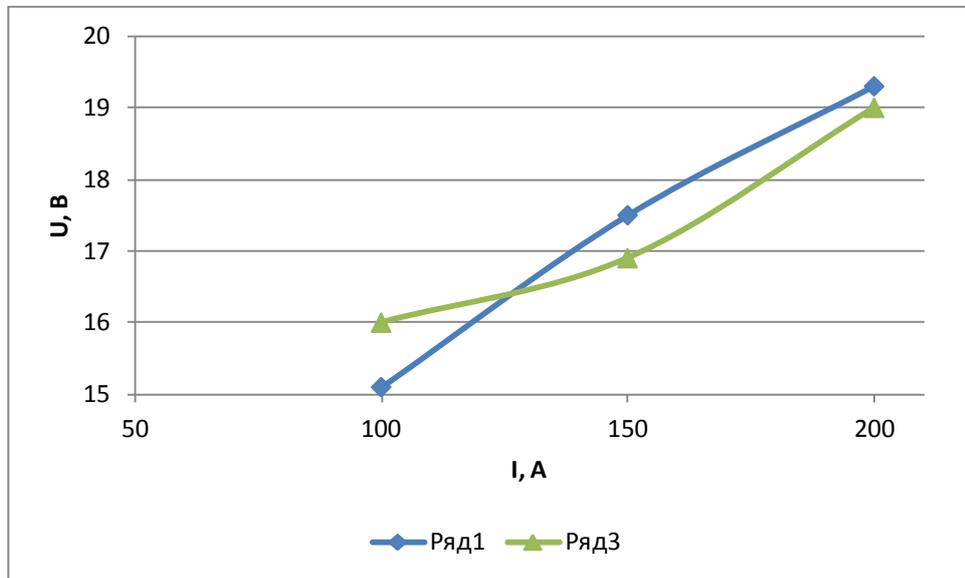
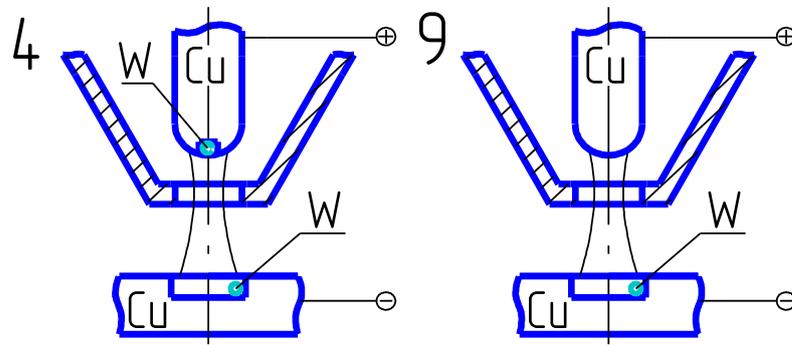


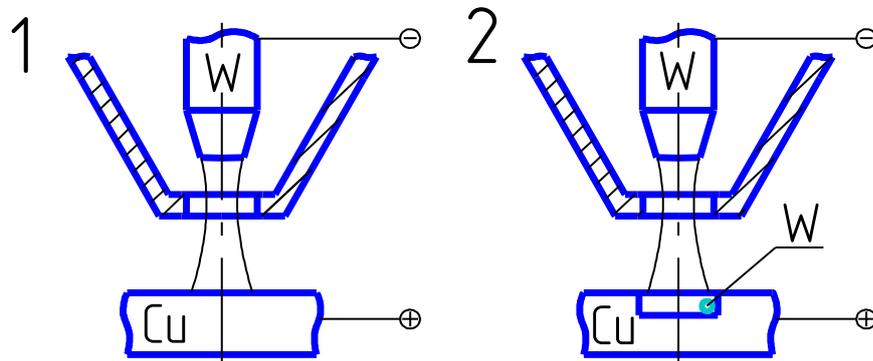
Рис. 3.2. Схема для работы на обратной полярности с медным электродом-анодом и медным имитатором изделия с вольфрамовым керном

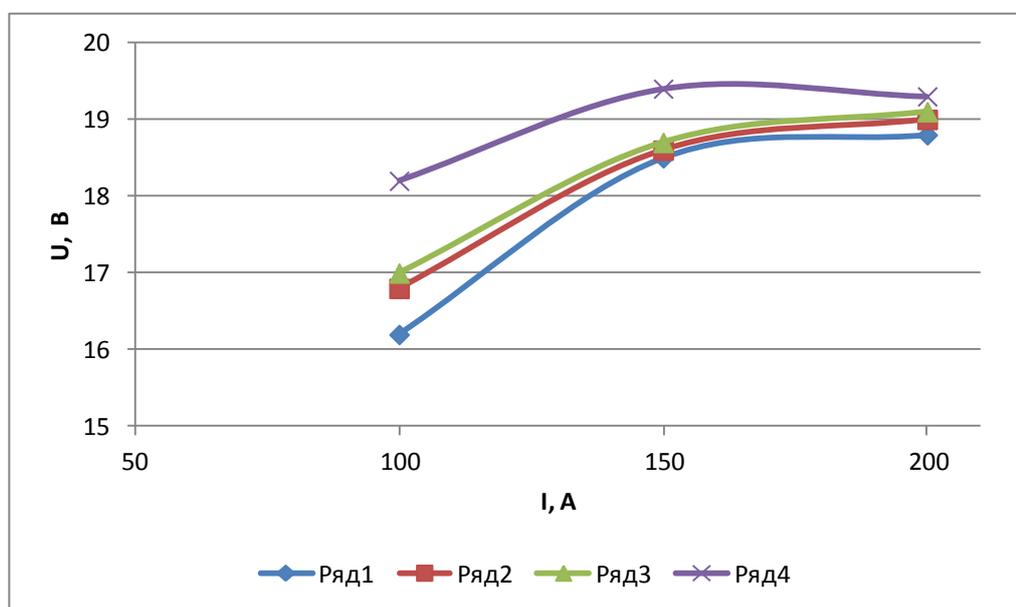
Из графиков (см. рис. 3.3; 3.4) видно, что материал анода не оказывает значительного влияния на анодное падение напряжения  $U_a$ .



Ряд1 - схема №4; Ряд3 - схема №9;

Рис 3.3. Распределение падения напряжения на участке сжатой дуги внутри плазматрона в зависимости от тока дуги при работе плазматрона обратной полярности ( $d_c = 5$  мм,  $h_{cu} = 5$  мм,  $G = 4$  л/мин)





Ряд1 –  $d_c = 3$  мм, схема №1; Ряд2 –  $d_c = 5$  мм, схема №1; Ряд3 –  $d_c = 3$  мм, схема №2; Ряд4 –  $d_c = 5$  мм, схема №2.

Рис. 3.4. Распределение падения напряжения на внешней части столба дуги в зависимости от тока дуги при работе плазматрона на прямой полярности ( $h_{cu} = 5$  мм,  $G = 4$  л/мин)

Необходимо отметить, что полученные в ходе исследований данные об изменении катодного падения напряжения в зависимости от материала катода и то, что материал анода не оказывает влияния на анодное падение напряжения, – хорошо согласуются с известными [85,90 - 94].

Ниже приводится сравнительный анализ тепловых нагрузок на электрод и плазмообразующее сопло при работе плазматрона на прямой и обратной полярности. Сравнительные показатели сгруппированы по ряду признаков и выборочно представлены в таблицах.

Рост  $I_0$ ,  $h_c$ , уменьшение  $G_n$ ,  $d_c$ ,  $h_{cu}$ , повышают тепловую нагрузку на плазмообразующее сопло (см. табл.3.2).

Выбор диапазона токов 50 – 250 А обусловлен технологическими параметрами процесса плазменной поверхностной термообработки. В работе исследован диапазон изменения токов до 400 А, однако применение столь высоких значений тока обработки в условиях производства нецелесообразно, так как возникает необходимость более интенсивного охлаждения теплонагруженных элементов плазматрона и обрабатываемого изделия.

## Тепловложение в электрод и плазмообразующее сопло при изменении параметров режима.

Обратная полярность	Прямая полярность
$d_c=3\text{мм}; h_{\text{эс}}=1\text{мм}; I_{\text{д}}=50-180\text{А}.$ $G_n=4,7$ л/мин; $P_{\text{э}}=225-1140\text{Вт}; P_c=163-1225\text{Вт}.$ $G_n=1,4$ л/мин; $P_{\text{э}}=295-1140\text{Вт}; P_c=245-1960\text{Вт}.$	$P_{\text{э}}=150-450\text{Вт}; P_c=209-1243\text{Вт}.$ $P_{\text{э}}=130-460\text{Вт}; P_c=377-2123\text{Вт}.$
$d_c=3\text{мм}; h_{\text{эс}}=3\text{мм}; I_{\text{д}}=50-180\text{А}.$ $G_n=4,7$ л/мин; $P_{\text{э}}=338-1140\text{Вт}; P_c=245-1307\text{Вт}.$ $G_n=1,4$ л/мин; $P_{\text{э}}=338-1140\text{Вт}; P_c=326-1936\text{Вт}.$	$P_{\text{э}}=150-430\text{Вт}; P_c=209-1228\text{Вт}.$ $P_{\text{э}}=146-440\text{Вт}; P_c=293-2123\text{Вт}.$
$d_c=3\text{мм}; h_{\text{эс}}=5\text{мм}; I_{\text{д}}=50-180\text{А}.$ $G_n=4,7$ л/мин; $P_{\text{э}}=199-1060\text{Вт}; P_c=122-1270\text{Вт}.$ $G_n=1,4$ л/мин; $P_{\text{э}}=199-1140\text{Вт}; P_c=245-2060\text{Вт}.$	$P_{\text{э}}=132-406\text{Вт}; P_c=251-1517\text{Вт}.$ $P_{\text{э}}=134-416\text{Вт}; P_c=377-2536\text{Вт}.$
$d_c=4\text{мм}; h_{\text{эс}}=1\text{мм}; I_{\text{д}}=50-200\text{А}.$ $G_n=4,7$ л/мин; $P_{\text{э}}=211-1056\text{Вт}; P_c=163-817\text{Вт}.$ $G_n=1,4$ л/мин; $P_{\text{э}}=253-1140\text{Вт}; P_c=245-1470\text{Вт}.$	$I_{\text{д}}=50-250\text{А}.$ $P_{\text{э}}=240-460\text{Вт}; P_c=355-1786\text{Вт}.$ $P_{\text{э}}=260-460\text{Вт}; P_c=419-2178\text{Вт}.$
$d_c=4\text{мм}; h_{\text{эс}}=3\text{мм}; I_{\text{д}}=50-200\text{А}.$ $G_n=4,7$ л/мин; $P_{\text{э}}=159-1074\text{Вт}; P_c=82-995\text{Вт}.$ $G_n=1,4$ л/мин; $P_{\text{э}}=238-1095\text{Вт}; P_c=163-1876\text{Вт}.$	$I_{\text{д}}=50-250\text{А}.$ $P_{\text{э}}=240-450\text{Вт}; P_c=209-2514\text{Вт}.$ $P_{\text{э}}=260-460\text{Вт}; P_c=419-2993\text{Вт}.$
$d_c=4\text{мм}; h_{\text{эс}}=5\text{мм}; I_{\text{д}}=50-200\text{А}.$ $G_n=4,7$ л/мин; $P_{\text{э}}=199-1074\text{Вт}; P_c=84-930\text{Вт}.$ $G_n=1,4$ л/мин; $P_{\text{э}}=163-1276\text{Вт}; P_c=199-1345\text{Вт}.$	$I_{\text{д}}=50-200\text{А}.$ $P_{\text{э}}=202-398\text{Вт}; P_c=355-2346\text{Вт}.$ $P_{\text{э}}=212-414\text{Вт}; P_c=526-3318\text{Вт}.$
$d_c=6\text{мм}; h_{\text{эс}}=1\text{мм}; I_{\text{д}}=50-250\text{А}.$ $G_n=4,7$ л/мин; $P_{\text{э}}=133-1515\text{Вт}; P_c=41-817\text{Вт}.$ $G_n=1,4$ л/мин; $P_{\text{э}}=83-1255\text{Вт}; P_c=81-1062\text{Вт}.$	$P_{\text{э}}=207-440\text{Вт}; P_c=140-1326\text{Вт}.$ $P_{\text{э}}=190-420\text{Вт}; P_c=251-1843\text{Вт}.$
$d_c=6\text{мм}; h_{\text{эс}}=3\text{мм}; I_{\text{д}}=50-200\text{А}.$ $G_n=4,7$ л/мин; $P_{\text{э}}=169-1478\text{Вт}; P_c=81-1062\text{Вт}.$ $G_n=1,4$ л/мин; $P_{\text{э}}=211-1490\text{Вт}; P_c=163-1415\text{Вт}.$	$P_{\text{э}}=200-460\text{Вт}; P_c=125-1370\text{Вт}.$ $P_{\text{э}}=180-420\text{Вт}; P_c=167-2681\text{Вт}.$
$d_c=6\text{мм}; h_{\text{эс}}=5\text{мм}; I_{\text{д}}=50-200\text{А}.$	

$G_n=4,7$ л/мин; $P_э=234-1591$ Вт; $P_c=81-980$ Вт.	$P_э=240-480$ Вт; $P_c=355-3100$ Вт.
$G_n=1,4$ л/мин; $P_э=234-1326$ Вт; $P_c=163-1464$ Вт.	$P_э=240-470$ Вт; $P_c=586-3672$ Вт.

$d_c$  – диаметр плазмообразующего сопла плазматрона;  $h_{эс}$  – расстояние от электрода до плазмообразующего сопла;  $I_d$  – ток дуги;  $G_n$  – расход плазмообразующего газа;  $u_d$  – напряжение дуги;  $u_{эс}$  – падение напряжения на участке электрод-сопло;  $u_{си}$  – падение напряжения на участке сопло-изделие;  $P_э$  – тепловложение в электрод;  $P_c$  – тепловложение в плазмообразующее сопло

Тепловложение в электрод-анод определяется, в основном, мощностью дуги  $P_d$  и мало зависит от остальных параметров. Увеличение  $G_n$  незначительно снижает тепловую нагрузку на анод, а рост  $d_c$  увеличивает. Тепловая мощность, отводимая в анод, находится в пределах 200 - 460 Вт при изменении  $P_d = 1000 - 4000$  Вт и составляет  $\eta_a \approx 11-20\%$ . Причины превышения тепловложения в электрод анод в сравнении с катодом известны [9,51,89].

В среднем тепловая нагрузка на плазмообразующее сопло при работе плазматрона на обратной полярности меньше, чем на прямой в 1,5 – 2,7 раза при прочих равных условиях, причем с ростом  $P_d$  и  $d_c$  разность увеличивается. Считается, что тепловложение в плазмообразующее сопло определяется мощностью столба дуги, расположенного внутри плазматрона [91, 92, 95, 96],  $P_{дз} = I_d u_{эс}$ . Однако  $P_d$  при работе плазматрона на обратной полярности значительно - в 1,4 - 2,2 раза больше, чем на прямой (см. гл.2), вследствие большего напряжения  $u_{эс}$ . При работе плазматрона на обратной полярности  $u_{эс on} = 16 - 30$ В, а  $u_{эс nn} = 5 - 10$ В.

При работе плазматрона на обратной полярности необходимо отметить, что сравнительный анализ величины нагрузки на теплонагруженные элементы плазматрона лучше проводить по  $P_d$ , а не по  $I_d$ , т.к. при работе плазматрона на обратной полярности напряжение на дуге  $u_d$  значительно выше, чем на прямой, и находится в пределах  $u_{d on} \approx 1,2 - 1,5 u_{d nn}$ . А при определении  $P_n$  для работы на обратной полярности слагаемое  $I_d \cdot (u_k - \varphi_e)$  можно подсчитать, приняв величину  $(u_k + \varphi_e = 5$ В) [51, 85]. Используя полученные ранее результаты исследования теплопередачи в

изделие можно определить влияние полярности и параметров режима на величину  $P_n$  (табл. 3.3).

Таблица 3.3.

Изменение тепловой мощности передаваемой изделию плазменным потоком на прямой и обратной полярности

$I_d, A$	$*P_{aCu}, Вт$	$P_{kCu}, Вт$	$P_{ион}, Вт$	$P_{unn}, Вт$	$P_{нон}, Вт$	$P_{ннн}, Вт$
<i>при</i> $d_c=6мм;$ $G_n=4,7$ <i>л/мин;</i>						
150	800	750	2610	2110	1860	1310
200	1200	1000	3500	3000	2500	1800
250	1400	1250	4200	3800	2950	2400
<i>при</i> $d_c=6мм;$ $G_n=1,4$ <i>л/мин;</i>						
150	850	750	1850	1500	1100	650
200	1150	1000	2600	2550	1600	1400
250	1380	1250	3300	3230	2050	1850
<i>при</i> $d_c=3мм;$ $G_n=4,7$ <i>л/мин;</i>						
100	630	500	2520	1980	2020	1350
150	880	750	4320	3010	3570	2130
180	1140	900	5650	4200	4750	3060
<i>при</i> $d_c=3мм;$ $G_n=1,4$ <i>л/мин;</i>						
100	600	500	1850	1590	1350	990
150	890	750	2710	1920	1960	1030
180	1140	900	3270	2800	2370	1660

$P_{aCu}$  – мощность выделяемая на аноде;  $P_{kCu}$  – мощность выделяемая на катоде;  $P_{ион}$  – мощность вводимая в изделие при работе на токе обратной полярности;  $P_{unn}$  – мощность вводимая в изделие при работе плазмотрона на токе прямой полярности;  $P_{нон}$  – мощность передаваемая изделию плазменным потоком при работе на обратной полярности;  $P_{ннн}$  – мощность передаваемая изделию плазменным потоком при работе на токе прямой полярности.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что тепловая мощность, передаваемая изделию плазменным потоком, составляет 55 – 70% всей мощности передаваемой изделию сжатой дугой, остальная часть передается за счет приэлектродных процессов на поверхности изделия. Причем при одинаковых режимах, при работе плазмотрона на обратной полярности, величина  $P_n$  в 1,2 – 1,5 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 плазмотрона на обратной полярности, можно активно управлять эффективностью процесса, изменяя параметры режима. Кроме того механизм теплопередачи в изделие за счет приэлектродных процессов существенно различается. В случае для прямой полярности зона контакта дуги с изделием представляет собой стационарное анодное пятно, а для обратной полярности – совокупность блуждающих нестационарных катодных пятен. Таким образом при работе плазмотрона на токе обратной полярности имеют место два источника нагрева – это поток плазмы и тепловыделение в нестационарных катодных пятнах блуждающих по поверхности изделие. При этом площадь блуждания катодных пятен ограничена и определяется рядом факторов (сварочный ток,  $I_{св}$ , расход защитного газа,  $G_z$ , л/мин, скорость перемещения плазмотрона,  $V_{св}$ , м/час), влияние которых рассмотрено далее.

### **3.1.1. Оценка площади теплового контакта плазменной дуги с изделием при работе плазмотрона на токе обратной полярности.**

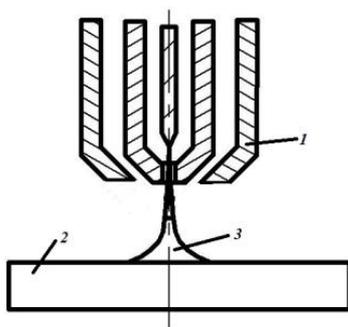
Известное явление катодной очистки при воздействии на поверхность металлов электрической дуги обратной полярности используется в ряде технологических процессов [97]. До сих пор нет четкого представления о природе процесса катодного распыления. Предположительно считается [97], что разрушение и удаление окисной пленки на поверхности изделия в зоне воздействия дуги на обратной полярности происходит в результате бомбардировки положительными ионами поверхности металла.

При работе плазмотрона на токе обратной полярности на поверхности, подвергаемой катодной очистке, остается видимый след[98] позволяющий наглядно оценить площадь блуждания катодных пятен (рис 3.5).

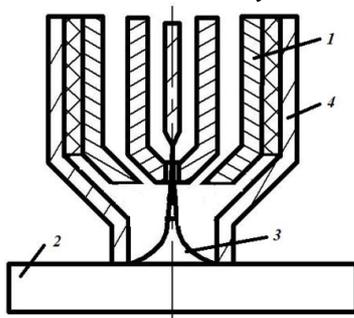


*Рис. 3.5. Процесс блуждания катодных пятен по поверхности изделия при работе плазмотрона на обратной полярности.*

Для начала определяли влияние параметров режима на блуждание пятен в режиме открытой и закрытой плазменных дуг прямого действия обратной полярности.



*Рис. 3.6. Структурная схема открытой дуги 1 – плазмотрон; 2 – изделие; 3 – плазменная дуга*



*Рис. 3.7. Структурная схема закрытой дуги 1 – плазмотрон; 2 – изделие; 3 – плазменная дуга; 4 – медный водоохлаждаемый концевик*

На этом этапе контрольным параметром являлась ширина зоны блуждания катодных пятен  $B_0$ .

Установлено, что решающее влияние на ширину зоны блуждания катодных пятен оказывают: сварочный ток,  $I_{св}$ , расход защитного газа,  $G_з$ , л/мин, скорость перемещения плазматрона,  $V_{св}$ , м/час (см. рис. 3.8 – 3.11). При этом при работе в режиме закрытой дуги решающее влияние оказывают лишь ток и скорость перемещения плазматрона, влияние расхода защитного газа не столь велико.

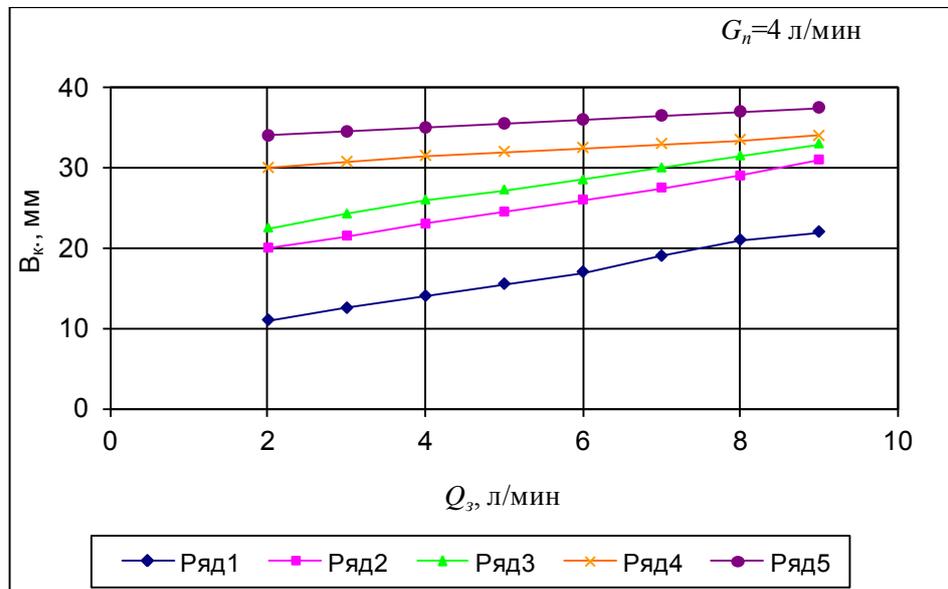


Рис. 3.8. Влияние расхода защитного газа на ширину зоны катодной очистки. Ряд 1 –  $I_d = 60$  А, открытая дуга; Ряд 2 –  $I_d = 100$  А, открытая дуга; Ряд 3 –  $I_d = 150$  А, открытая дуга; Ряд 4 –  $I_d = 100$  А, закрытая дуга; Ряд 5 –  $I_d = 150$  А, закрытая дуга; при  $V_d = 16$  м/час,  $G_n = 4$  л/мин,  $d_c = 6$  мм, и  $h = 7$  мм.

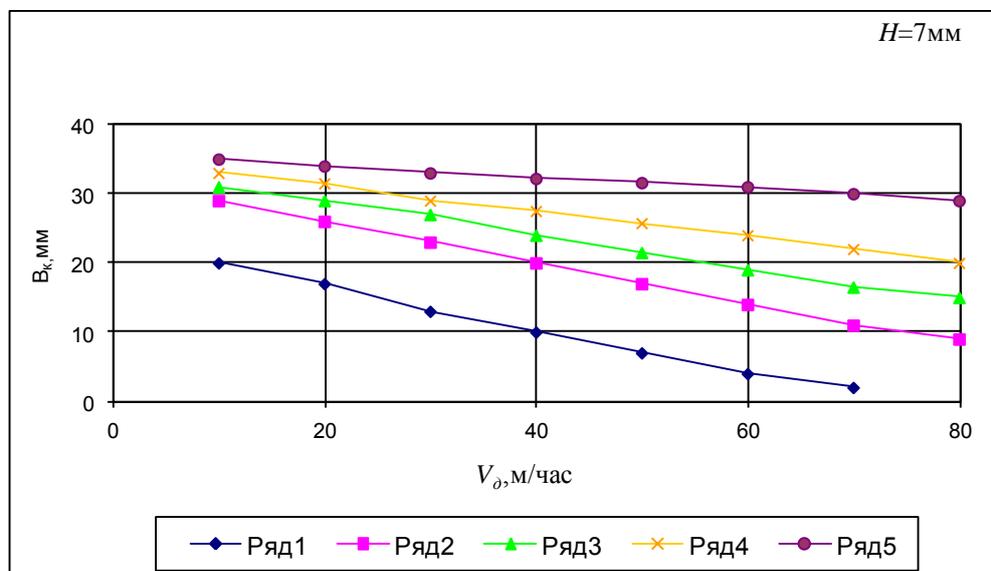


Рис. 3.9. Влияние скорости сварки на ширину зоны катодной очистки. Обозначения и условия смотри рис. 3.8. при  $G_з = 5$  л/мин.

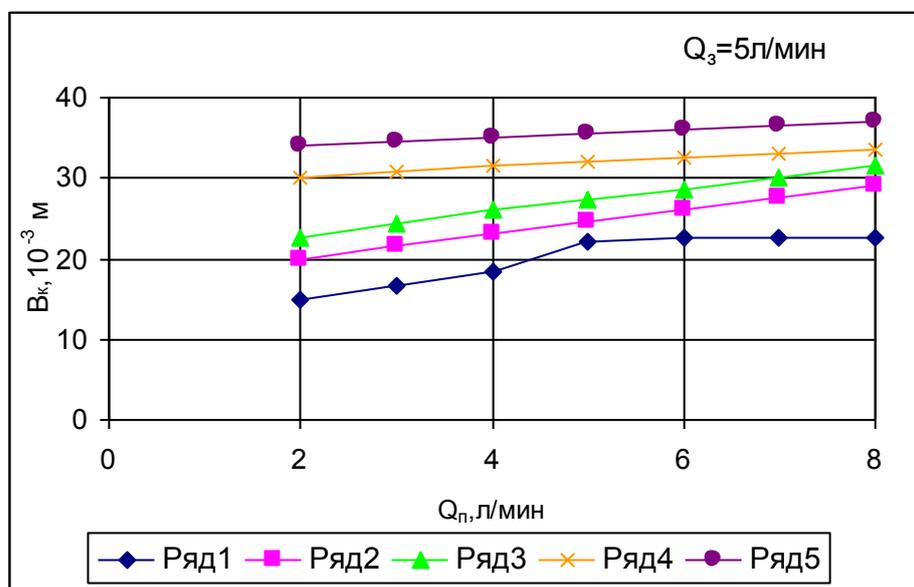


Рис. 3.10. Влияние расхода плазмообразующего газа на ширину зоны катодной очистки. Обозначения и условия смотри рис. 3.8. при  $G_3 = 5$  л/мин.

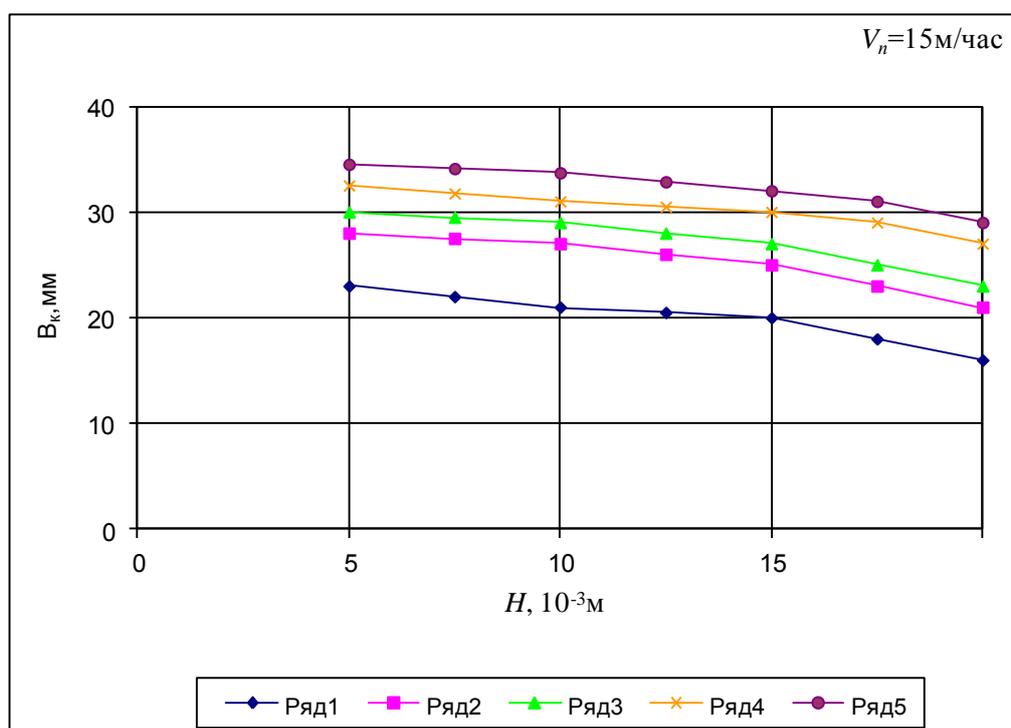


Рис. 3.11. Влияние расстояния от среза сопла до изделия на ширину зоны катодной очистки. Обозначения и условия смотри рис. 3.8. при  $G_3 = 5$  л/мин.

Увеличение  $I_{св}$  и  $G_3$  и уменьшение  $V_{св}$  расширяют зону катодной очистки, причем, рост происходит до определенного предела ( $B_0 = 1,5 D_3$ ), где  $D_3$  диаметр защитного сопла плазмотрона. Значительное увеличение  $I_0$  или уменьшение  $V_0$  приводит к подплавлению поверхности образцов и соответственно к привязке дуги.

Стоит отметить что использование закрытой дуги уменьшает влияние расходов защитного  $G_z$  и плазмообразующего газов  $G_n$ , и скорости обработки  $V_0$  на ширину зоны катодного воздействия. Вследствие полного заполнения камеры аргоном удастся достичь размеров ширины зоны более чем  $1,5 D_z$ , ограничиваясь геометрическими размерами камеры.

### **3.2. Моделирование процесса теплопередачи в изделие при работе плазмотрона на токе обратной полярности.**

В результате проведенных исследований установлено, что плазменная дуга обратной полярности обладает достаточной тепловой эффективностью для проведения плазменной поверхностной термообработки при меньших погонных энергиях в отличие от обработки на прямой полярности. Кроме того площадь теплового воздействия значительно выше чем при работе на токе прямой полярности, что позволяет сократить число проходов при обработке заданной площади.

Исходя из всего вышесказанного предлагается при расчете температурных полей при обработке на обратной полярности использовать комбинированный источник нагрева (рис. 3.12).

Для решения задач теплопроводности применяют аналитические и численные методы. Существующие аналитические методы дают возможность получать решения только для процессов, описываемых линейными дифференциальными уравнениями при линейных граничных условиях, т.е. для тех случаев, когда теплофизические свойства можно считать не зависящими от температуры. Аналитические методы приводят к общим уравнениям процессов, действительным при разнообразных числовых значениях параметров, характеризующих данную задачу: геометрических размеров, тепловых характеристик режима нагрева и физических свойств металла. В простейших задачах удастся получить решение в замкнутой форме, т.е. выразить уравнение процесса через известные функции от времени, пространственных координат и постоянных параметров процесса. В более сложных задачах решения описываются определенными интегралами или бесконечными рядами. Численные методы,

в отличие от аналитических, позволяют решать задачу теплопроводности в сложной постановке, т.е. с учетом реальной геометрии конструкции, температурной зависимости теплофизических свойств, распределенности источника нагрева и т.д. В настоящее время наиболее распространенным является численный метод конечных элементов (МКЭ, или FEM). Современные программные продукты, например ANSYS, COMSOL предоставляют широкие возможности расчета теплопроводности при сварке. Численные расчеты сообщают информацию только для данных условий задачи при определенных значениях всех постоянных параметров. Численный метод не дает, подобно аналитическому, общего решения задачи, но его целесообразно применять для инженерных расчетов в тех случаях, когда получение аналитического решения ввиду сложности условий задачи становится крайне трудоемким или вообще недоступным.

В нашем случае, как было отмечено ранее рассматривается полубесконечное тело (см. гл. 2).

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:

$$q = q_1 + q_2 \quad (3.3)$$

где:  $q_1 = k_1 * Q_u$  - мощность, передающая совокупное тепловое воздействие катодных пятен;  $q_2 = k_2 * Q_u$  - мощность передаваемая 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.

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 равномерно распределенным поверхностным источником тепла.

Тепло передаваемое плазменным потоком можно представить в виде поверхностного источника нагрева с нормальным распределением теплового потока в пятне нагрева радиусом  $r$ [99]:

$$q_2(r) = q_{2m} \exp(-kr^2), \quad (3.4)$$

где:  $q_2(r)$  – удельный тепловой поток в любой точке пятна нагрева;  $q_{2m}$  – наибольший удельный тепловой поток в центре пятна нагрева;  $k$  – коэффициент сосредоточенности теплового потока.

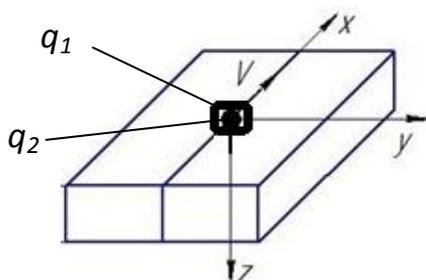


Рис.3.12. Схема комбинированного источника нагрева.

Обычно принято считать радиусом пятна нагрева расстояние, на котором удельный тепловой поток  $q_2(r_H) = 0,05q_{2m}$ . В этом случае  $k = 3/r_H^2$ , а  $q_{2m}$  определяется через полную мощность теплового источника, связанного с тепловым потоком,  $q_{2m} = 2q_2 \frac{k}{\pi}$

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[100]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + V \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{Q}{c\rho} \quad (3.5)$$

где:  $Q$  – эффективная тепловая мощность дуги Вт;  $V$  – скорость обработки м/ч;  $a$  – коэффициент температуропроводности м<sup>2</sup>/с;  $c$  – удельная теплоемкость Дж/кг\*К;  $\rho$  – плотность материала кг/м<sup>3</sup>

Дифференциальное уравнение переноса энергии является математической моделью целого класса явлений теплопроводности и имеет бесконечное множество решений. Чтобы получить из этого множества одно частное решение, характеризующее конкретный процесс, необходимо иметь дополнительные данные, не содержащиеся в исходном дифференциальном уравнении. Эти дополнительные условия, которые в совокупности с дифференциальным уравнением определяют конкретную задачу, называются условиями однозначности. Условия однозначности включают в себя геометрические условия, физические свойства тела, граничные и начальные условия.

Геометрия задачи представлена на рис. 3.12. Использовались граничные условия смешанного типа. На границе 1 (рис. 3.12) условия первого рода, температура поверхности  $T=293$  К. На остальных поверхностях задавались граничные условия второго рода. На поверхности 2 величина удельного теплового потока:

$$q = q_1 + q_2, \quad (3.6)$$

где:  $q_1 = Q_1/f$  – удельная мощность, передаваемая за счет катодных пятен Вт/м<sup>2</sup> ( $f$  – площадь блуждания катодных пятен, м<sup>2</sup>),  $q_2$  – мощность передаваемая потоком плазмы, Вт/м<sup>2</sup> (3.4).

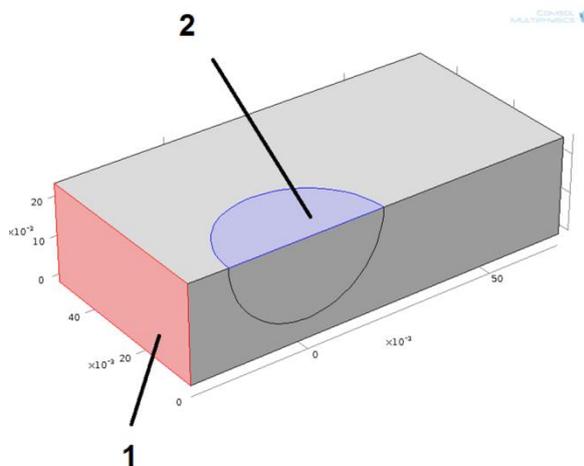


Рис.3.12. Геометрия задачи.

На рис. 3.13 – 3.15 представлены результаты решения задачи теплопроводности в программном комплексе COMSOL Multiphysics для стали 40X13:

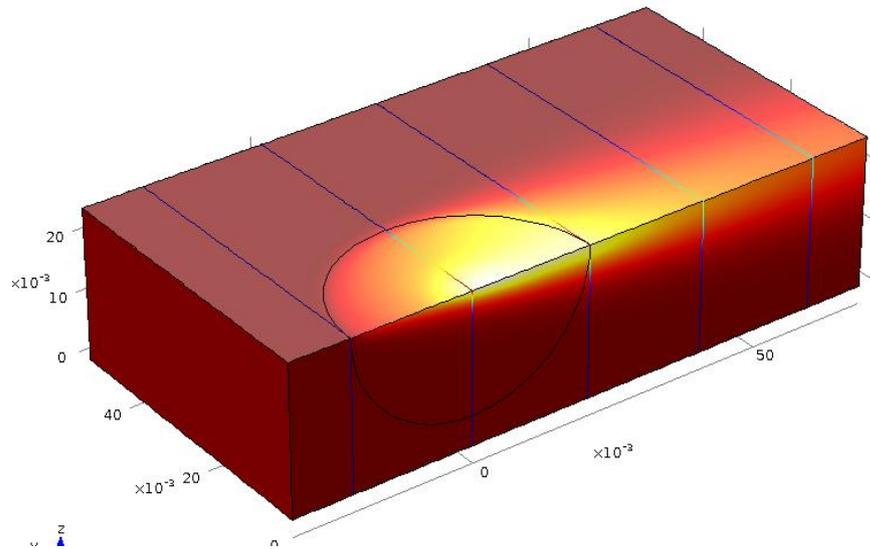


Рис.3.13. Температурное поле на поверхности обрабатываемого образца из стали 40X13.

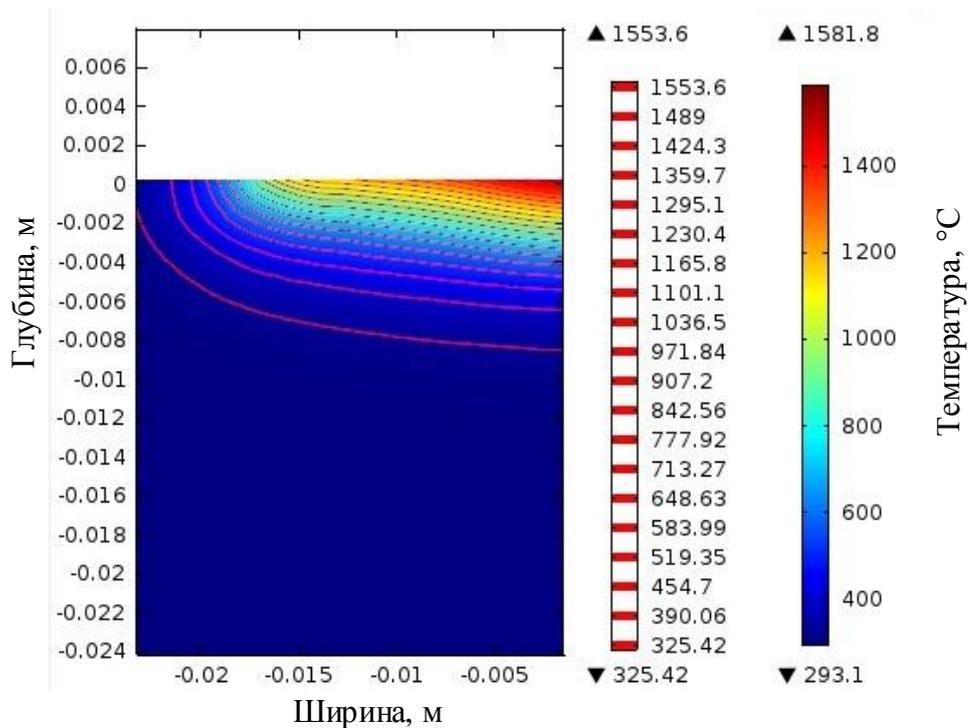
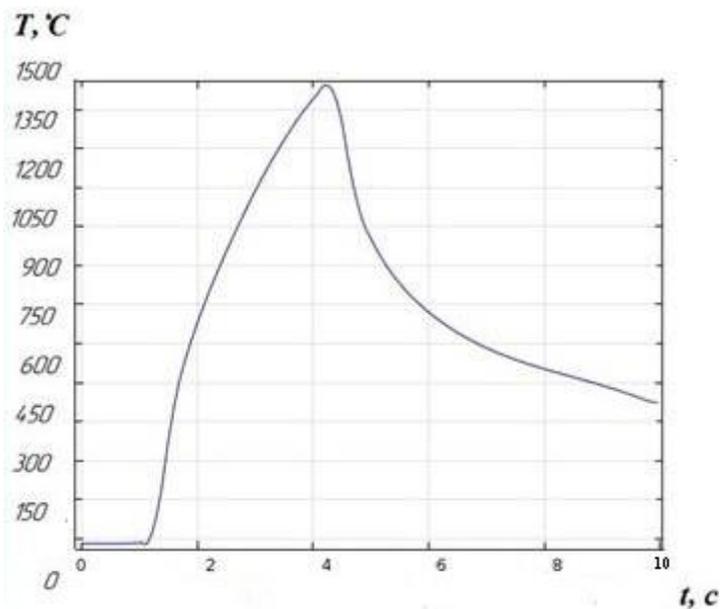
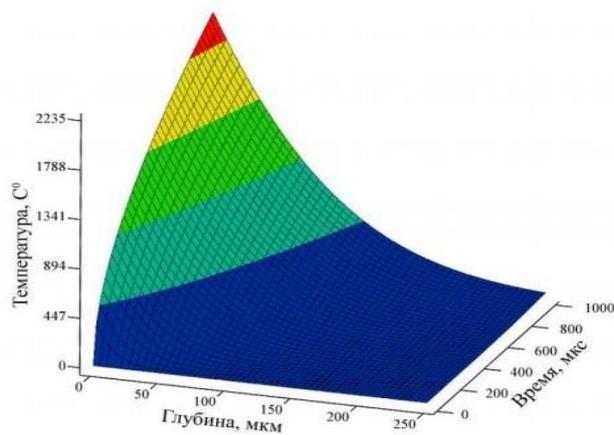


Рис.3.14. Распределение температур по по глубине образца ( $I_0=200$  А;  $V_{пер} = 7.5$  м/ч;  $d_c = 5$  мм).

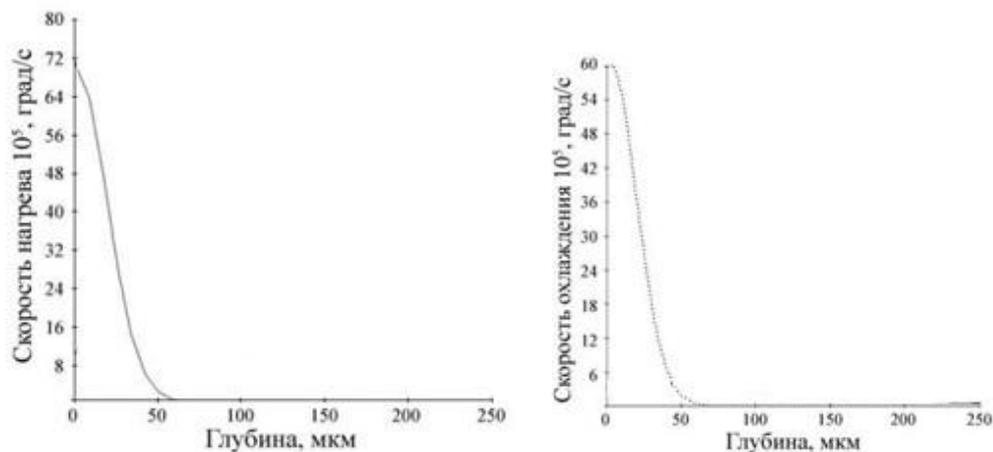


*Рис.3.15 Термический цикл нагрева – охлаждения поверхности при действии комбинированного источника теплоты.*

По результатам проведенных исследований установлено, что при работе плазмотрона на токе обратной полярности в начальный момент времени теплопередача в изделие осуществляется в основном за счет тепловыделения в катодных пятнах, далее за счет плазменного потока и механизма теплопроводности от поверхностного слоя в глубинные слои материала детали. Исходя из вышесказанного представляют интерес тепловые процессы на поверхности изделия при воздействии одного пятна.



*Рис.3.16. Распределение температуры по глубине образца при воздействии одного пятна*



*Рис.3.17. Скорости нагрева и охлаждения по глубине при воздействии одного пятна.*

Таким образом плазменная поверхностная закалка на токе обратной полярности может использоваться для получения упрочненных слоев без оплавления поверхности глубиной около 2 мм, либо для получения тонких упрочненных слое глубиной около 0.25 мм при помощи малоамперной дуги. Кроме того, благодаря высоким градиентам температур создаваемым на поверхности изделия блуждающими катодными пятнами, применение обратной полярности целесообразно в процессах плазменной наплавки для увеличения ширины наплавляемых валиков и снижения доли участия основного металла в наплавленном.

### **Выводы по главе 3:**

1. 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.

2. Определено различие теплопередачи в изделие за счет процессов в приэлектродных областях: в анодной области для обработки на прямой полярности, и в катодной области для обратной полярности.
3. Установлено, что при работе на токе обратной полярности площадь зоны теплопередачи в изделие определяется шириной зоны катодной очистки. Определено влияние параметров режимов на ширину зоны катодного воздействия в режиме открытой и закрытой плазменных дуг прямого действия обратной полярности. Показано что при использовании закрытой дуги удается увеличить зону катодного воздействия более чем в 1,5 раза по сравнению с открытой дугой.
4. Разработана тепловая модель плазменной поверхностной термообработки на токе обратной полярности, учитывающая два механизма нагрева изделия: от потока плазмы(столба дуги) и за счет тепловыделения в нестационарных катодных пятнах.

## **4. Исследование плазменной поверхностной термообработки и наплавки стали 40X13 на токах прямой и обратной полярности.**

### **4.1. Определение требуемых параметров режима плазменной закалки опорной пары мостовой конструкции.**

В основе плазменного поверхностного упрочнения металлов лежит способность плазменной дуги создавать на небольшом участке поверхности высокие плотности теплового потока, достаточные для нагрева и плавления практически любого металла [8]. Основной физической характеристикой плазменного упрочнения является температурное поле, значение которого дает возможность оценить температуру в разных точках зоны термического воздействия (в разные моменты времени), скорость нагрева и охлаждения, а в конечном итоге прогнозировать структурное состояние и фазовый состав поверхностного слоя материала [20].

В представленной работе разрабатывалась технология получения упрочненного слоя опорной пары мостовой конструкции со следующими характеристиками: твердость поверхностного слоя 49 - 54 HRC, глубина упрочненного слоя 4 мм, твердость на глубине 4 мм. не ниже 42 HRC, с сохранением исходных свойств в сердцевине изделия. Опорная пара является тяжело нагруженным элементом мостовой конструкции и представляет собой каток перемещающийся по поверхности плиты. Конструкция массивная и габаритная, вес катка порядка 300 кг, вес плиты порядка 80 кг, диаметр катка 284 мм, размеры плиты 1000x290x40 мм [20].

Материал катка и плиты – коррозионно-стойкая сталь мартенситного класса 40X13 имеющая в исходном состоянии структуру сорбита отпуска и твердость порядка 15 - 20 HRC. Благодаря малой критической скорости закалки стали 40X13 закаливаются на мартенсит при охлаждении на воздухе (рис.4.1) [21].

Оптимальная структура изделий из этих сталей достигается закалкой на воздухе от температур 1000—1020°С, так как только выше этих температур происходит полное растворение карбидов  $Cr_{23}C_6$  в аустените. Непосредственно после закалки сталь 40X13 имеет твердость HRC 56-58.

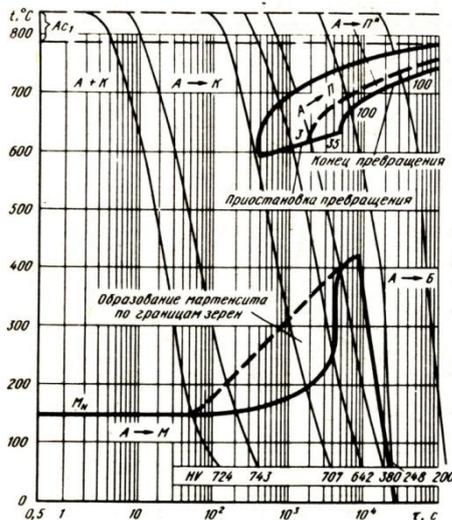


Рис.4.1. Кривые охлаждения для стали 40X13

После отпуска при 200—300 °С (с целью получения высоких значений твердости) - HRC 50, а после отпуска при 600 °С (для получения требуемых значений ударной вязкости) - HRC 32-34. В интервале 480-520 °С наблюдается существенное снижение пластичности и ударной вязкости сталей из-за развития отпускной хрупкости [101].

По результатам исследований проведенных в главе 2 установлено, что для решения задачи получения глубины упрочненного слоя в 4 мм целесообразно использовать предлагаемую математическую модель плазменной поверхностной термообработки на основе решения краевой задачи теплопроводности (см. гл.2 ур-е 2.8). Решение математической модели для граничных условий второго рода и погонной энергии процесса  $E = 28,8 \text{ кДж/см}$  позволило получить термический цикл закалки (рис. 4.2. а) и график скоростей нагрева и охлаждения (рис.4.2. б). Выбор технологического варианта был остановлен на плазменной поверхностной закалке на токе прямой полярности с оплавлением поверхностного слоя[102,103].

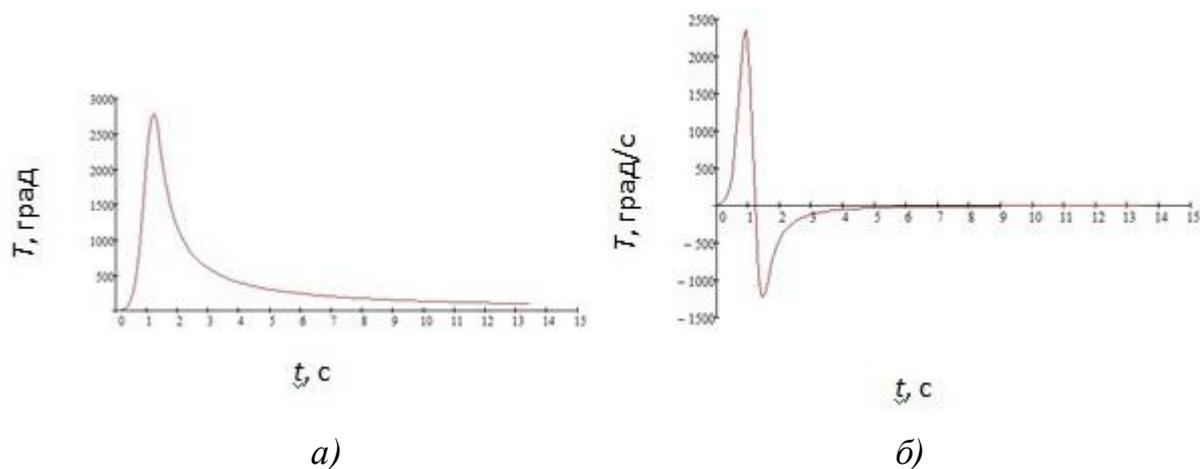


Рис.4.2. Термический цикл (а) и скорости нагрева и охлаждения (б) при поверхностной термообработке при  $E = 28,8$  кДж/см.

Температурные поля (рис.4.3), а также термоцикл и график скоростей охлаждения (рис. 4.2), при совмещении с данными диаграммы состояния сплавов Fe – Cr, и С-образными кривыми для стали 40Х13 (рис.4.1) позволяют спрогнозировать возможные фазовые и структурные превращения при плазменной поверхностной обработке.

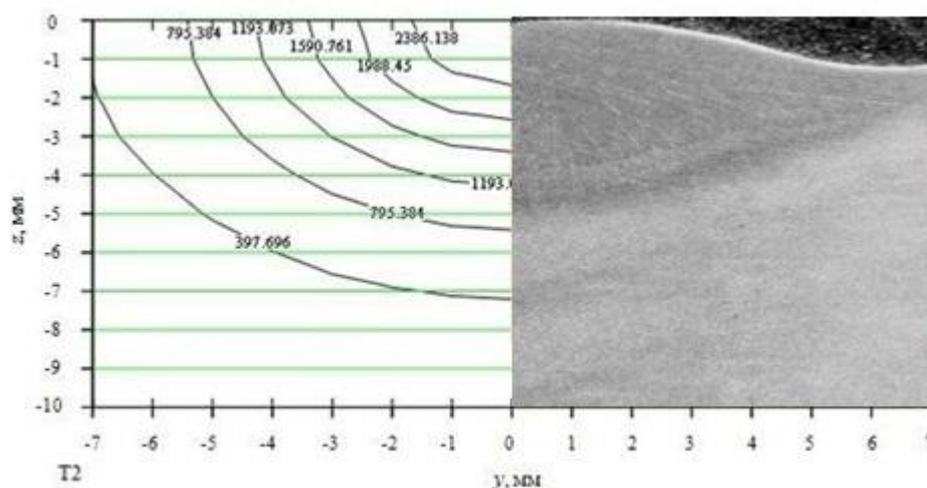


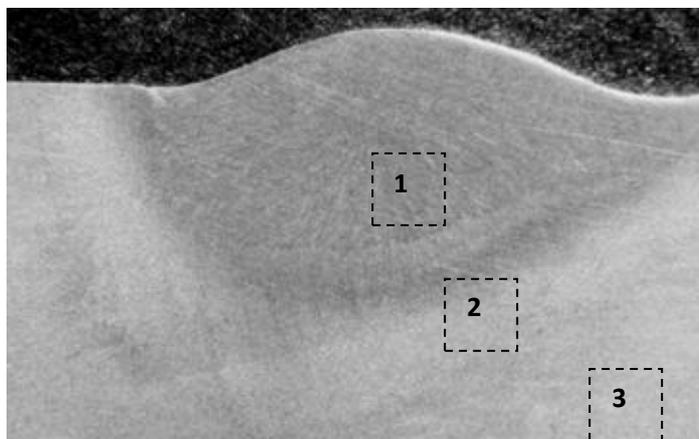
Рис. 4.3. Расчётное температурное поле по глубине изделия при плазменной закалке с оплавлением поверхности на токе прямой полярности при  $E = 28,8$  кДж/см.

Можно сделать вывод, что 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 ( $T < 910^{\circ}\text{C}$ ).

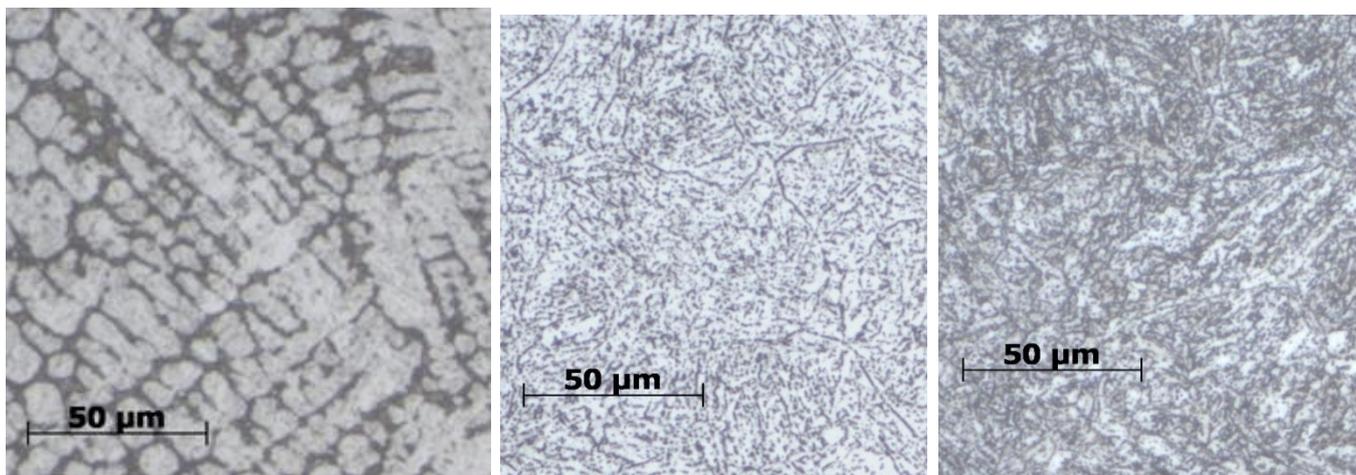
Для практического подтверждения теоретических предположений был проведен металлографический анализ полученного образца с использованием следующего оборудования:

- электро-эрозионная резка[105];
- шлифовальный станок SIS 1000;
- заливочный пресс Leco PR-32;
- микроскоп Axiovert 40 MAT.

Металлографический анализ показал следующий результат (рис.4.4):



*вид макрошлифа*



участок 1

участок 2

участок 3

*Рис.4.4. Макро(х8)- и микроструктура(х400) полученного образца*

Величина усиления - 0,4...0,6мм, ширина закаленной дорожки за один проход - 9,5...10,6мм, глубина упрочненной зоны - 4,35мм. Структура основного материала – сорбит отпуска. Структура зоны оплавления (рис. 4.4 уч. 1) представляет собой мартенсит с выделениями карбидной фазы по осям дендритов. В зоне закалки из твердой фазы (рис. 4.4 уч. 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 (зоне термовлияния) (рис. 4.4 уч. 3) – структура имеет вид феррито-карбидной смеси сорбитного типа различной дисперсности.

Значения микротвердости основных зон представлены в таблице 4.1:

Таблица 4.1.

Микротвердость по зонам.

Микротвердость по зонам, Н <sub>μ50</sub> , кгс/мм <sup>2</sup>			
зона оплавления (1)	Зона закалки из твёрдой фазы (2)	ЗТВ(3)	основной материал
452...566	566...594	495...537	279...292

Таким образом при погонной энергии процесса плазменной поверхностной закалки  $E = 28,8$  кДж/см достигаются требуемые характеристики упрочненного слоя. Технологическими параметрами процесса плазменной поверхностной термообработки являются скорость перемещения плазматрона относительно изделия  $V_{пер}$ , величина и полярность тока  $I_д$  плазменной дуги, напряжение дуги  $U_д$ , диаметр плазмообразующего сопла  $d_c$ , расход плазмообразующего  $G_n$  и защитного  $G_z$  газов [104]. Погонная энергия процесса определяется:

$$E = \frac{I_д U_д}{V_{пер}}, \quad (4.1)$$

где:  $E$  – погонная энергия процесса плазменной закалки, Дж/см  $V_{пер}$  – скорость обработки, см/с;  $I_д$  – ток плазменной дуги, А;  $U_д$  – напряжение дуги, В.

Исходя из вышесказанного были приняты следующие режимы плазменной поверхностной закалки (табл. 4.2).

Использование приведенных режимов плазменной закалки позволяет получить упрочненный слой глубиной 4.35 мм с мартенситной структурой и равномерно распределенными по сечению значениями микротвердости без изменения геометрической формы и структуры сердцевины детали из стали 40X13.

Таблица 4.2.

## Режимы плазменной поверхностной закалки

полярность тока	$I_{\delta}$ , А	$U_{\delta}$ , В	$V_{пер}$ , м/ч	$d_c$ , мм	$G_n$ , л/мин	$G_z$ , л/мин	$H$ , мм
прямая	150 - 260	24	12 - 25	7	3.8	4,2	5

$I_{\delta}$  – ток дуги;  $U_{\delta}$  – напряжение дуги;  $V_{пер}$  – скорость перемещения плазмотрона относительно изделия;  $d_c$  – диаметр плазмообразующего сопла плазмотрона;  $G_n$ ,  $G_z$  – расходы плазмообразующего и защитного газов;  $H$  – расстояние от среза сопла до обрабатываемой поверхности.

Ширина упрочненной зоны за один проход составляет примерно 11 мм, упрочнение поверхности заданной площади осуществляется последовательным формированием зоны закалки в виде протяженных полос встык [103] (рис 4.5).

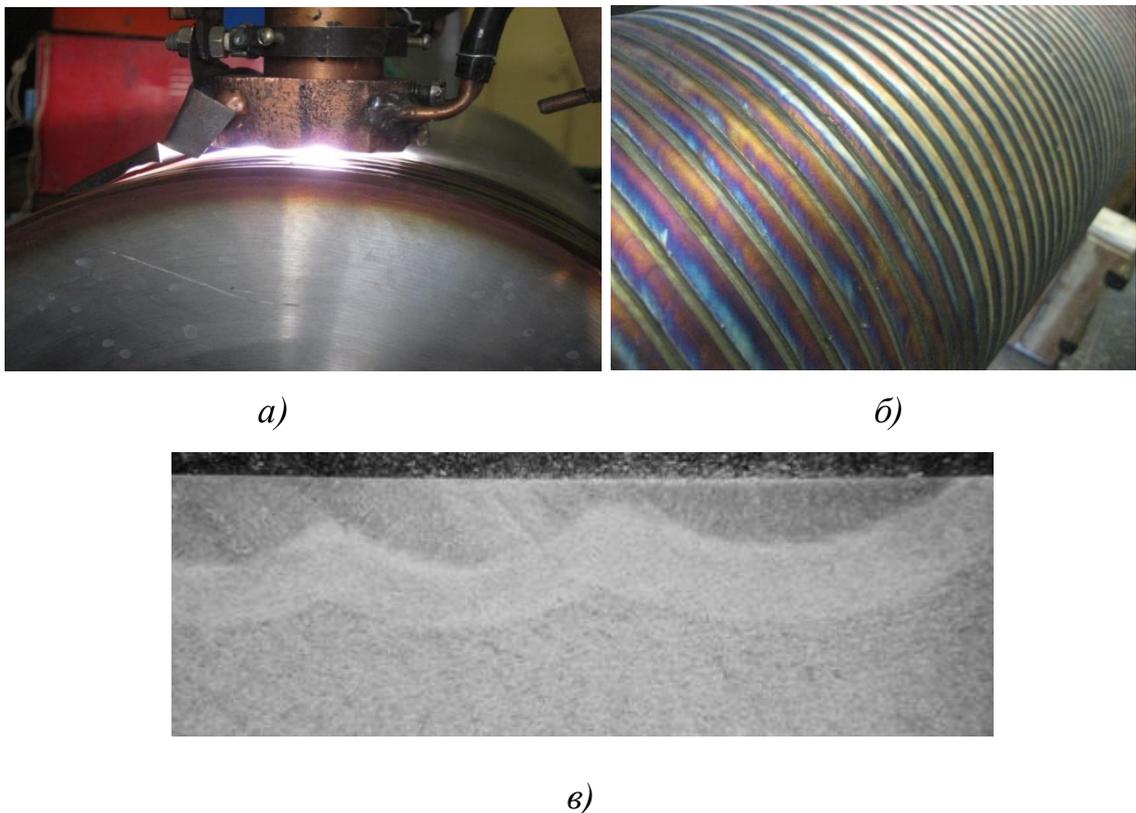


Рис. 4.5. Процесс плазменной поверхностной закалки (а) и внешний вид упрочненной поверхности катка после закалки (б) и упрочненного слоя после механической обработки (в).

Требуемые значения погонной энергии процесса плазменной закалки достигаются в диапазоне токов  $I_{\delta} = 150 - 260$  А и скоростей обработки  $V_{пер} = 12 - 25$  м/ч. Однако различное сочетание параметров и технологических

вариантов бы схожих величинах погонной энергии процесса дает различный результат. Это отражается в различном строении упрочненной зоны, ее геометрических и прочностных характеристиках.

#### 4.2. Влияние технологических параметров плазменной закалки на токе прямой полярности на структуру и свойства упрочненной зоны.

Технологическими параметрами процесса плазменной поверхностной термообработки являются скорость перемещения плазмотрона относительно изделия  $V_{пер}$ , величина тока дуги  $I_0$ , расход плазмообразующего  $G_n$  и защитного  $G_3$  газов. В результате проведенных экспериментов были получены образцы для различных технологических вариантов плазменной поверхностной закалки.

В данной работе были исследованы образцы полученные на следующих режимах (табл. 4.3) при диаметре плазмообразующего сопла  $d_c = 7$  мм и расстоянии от среза сопла до изделия  $H = 5$  мм:

Таблица 4.3.  
Параметры режимов термообработки образцов

№ образца	$E$ , кДж/см	Технологический вариант	$G_n$ , л/мин	$G_3$ , л/мин	Мех. обработка
1	25	без зазора и перекрытия упр. зон + повторный переплав $E = 27$ кДж/см	3,8	5,5	нет
2	23	без зазора и перекрытия упр. зон	3,8	5,5	шлифовка на 0,2-0,4 мм
3	23	без зазора и перекрытия упр. зон	3,8	5,5	нет
4	20	без зазора и перекрытия упр. зон	3,8	5,5	нет
5	18	без зазора и перекрытия упр. зон	3,8	5,5	нет
6	18	без зазора и перекрытия упр. зон + повторный проход в стыке	3,8	5,5	нет

		без плавления $E = 3,5 \text{ Дж/см}$			
7	28	без зазора и перекрытия упр. зон	3,8	5,5	шлифовка на 0,2-0,4 мм
8	27	без зазора и перекрытия упр. зон + повторный проход в середине каждой упр. дорожки без плавления $E = 3,5 \text{ Дж/см}$	3,8	5,5	нет

Металлография полученных образцов рассмотрена в приложении 1.

Результаты замеров микротвёрдости образцов представлены в таблице 4.4:

Таблица 4.4  
Микротвёрдость различных зон упрочненного слоя

№ образца	Микротвердость по зонам, $H_{\mu 50}$ , кгс/мм <sup>2</sup>			
	зона оплавления	ЗТВ у границы сплавления	ЗТВ	основной материал
1	центральная зона упр. дор. 310...506, остальная часть 535...715	488	426...486	201...207
2	388...581	498	208...491	216...217
3	402...596	599	495...537	279...292
4	337...471	492...537	204...500	193...207
5	424...506	525	228...514	203...218
6	413...489	358...484	206...415	209...225
7	392...503	429...460	267...479	238...239
8	432...507	411...468	187...468	187...193

В результате проведённых металлографических исследований и замеров микротвёрдости, образцов полученных по разным схемам и режимам были сделаны следующие выводы:

Наименьшие значения твёрдости были достигнуты на образцах №4 и 6. Упрочнённый слой данных образцов имеет структуру бейнитного типа. Исходя из этого, можно сделать вывод, что структура бейнитного типа не позволяет достичь необходимых значений твёрдости упрочнённого слоя.

Наибольшие значения твёрдости и глубины упрочнённого слоя были получены на образцах №1, 2, 3, 7. Обработанная зона данных образцов имеет структуру мартенситного типа, что свидетельствует о том, что она удовлетворяет требованиям поставленной задачи.

Не смотря на высокие значения твёрдости и глубины упрочнённого слоя образца №1, на его поверхности наблюдались наибольшие деформации и наличие усадочных рыхлот, что явилось следствием жёсткого режима термообработки.

На образце №8, имеющем дополнительные промежуточные проходы на мягких режимах, в результате повторного нагрева, на поверхности образовалась структура бейнитного типа, что и привело к низким значениям твёрдости на поверхности упрочнённого слоя.

Повышенный перепад значений твёрдости в зоне оплавления возможно связан с особенностями кристаллизации металла при затвердевании.

Наибольшие значения твёрдости на всех образцах достигаются у границы сплавления, что связано с протеканием в этой зоне мартенситного превращения, и равномерностью полученной структуры.

В зоне термовлияния преобладают структуры ферито-карбидной смеси и мартенсита отпуска с плавным переходом к структуре основного металла. Твёрдость в этой зоне плавно снижается по мере удаления от зоны сплавления.

Оптимальным вариантом с точки зрения ширины упрочненной зоны за один проход, глубины и твердости упрочненной зоны после мех. обработки является вариант №7.

Для всех исследованных режимов требуется проведение низкотемпературного отпуска обработанных изделий для снятия закалочных напряжений.

#### **4.3. Влияние параметров режима плазменной закалки на токе обратной полярности на структуру и свойства упрочненной зоны**

Для упрочнения поверхностей тяжело нагруженных изделий оправдано применение плазменной закалки на токе прямой полярности с оплавлением

поверхности, с целью получения максимальной глубины и твердости упрочненного слоя. Однако при таком варианте обработки происходит образование грубой литой структуры с высокими прочностными, но пониженными характеристиками ударной вязкости и усталостной прочности[106].

Плазменная поверхностная термообработка на токе обратной полярности, благодаря особенностям теплопередачи в изделие, позволяет получать упрочненные слои достаточной глубины без оплавления поверхности. При таком варианте термообработки происходит равномерный нагрев по ширине упрочненной зоны и, за счет катодных явлений на поверхности изделия, обеспечиваются высокие скорости нагрева и охлаждения необходимые для проведения закалки поверхности[106 - 108].

По аналогии с прямой полярностью технологическими параметрами процесса плазменной поверхностной термообработки на токе обратной полярности являются скорость перемещения плазмотрона относительно изделия  $V_{пер}$ , величина тока дуги  $I_0$ , расход плазмообразующего  $G_n$  и защитного  $G_z$  газов. В данной работе были исследованы образцы обработанные на следующих режимах без оплавления поверхности:

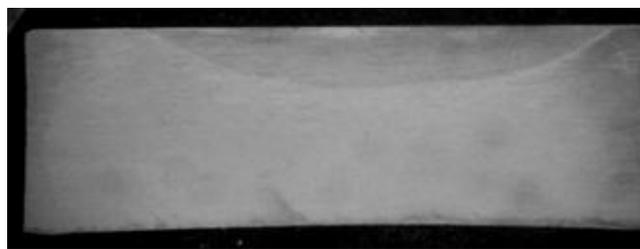
Таблица 4.5.  
Параметры режимов

№ обр.	Погонная энергия процесса $E$ , кДж/см	Полярность тока	Технологический вариант обработки	Расход плазмообразующего газа $G_n$ , л/мин	Расход защитного газа $G_z$ , л/мин
1	3	обратная	без зазора и перекрытия упр. зон	2,8	3,5
2	36	обратная	без зазора и перекрытия упр. зон	3,8	5,5

Вид макрошлифов исследуемых образцов представлен на рисунке 4.6.



1



2

*Рис.4.6. Вид макрошлифов(х8) образцов полученных при обработке на токе обратной полярности.*

Рассмотрим подробнее образцы, полученные при обработке на токе обратной полярности открытой дугой. Внешний осмотр показал следующее:

**образец № 1**(рис 4.6 1):одна дорожка шириной 15...20 мм. Изменение рельефа на двух участках в виде появления шероховатости. В местах изменения рельефа поверхность окислена до темно-синего цвета. На остальной поверхности изменения рельефа нет, поверхность разных оттенков светло-серого цвета. Изменение цвета наблюдается в виде неравномерной пятнистости.

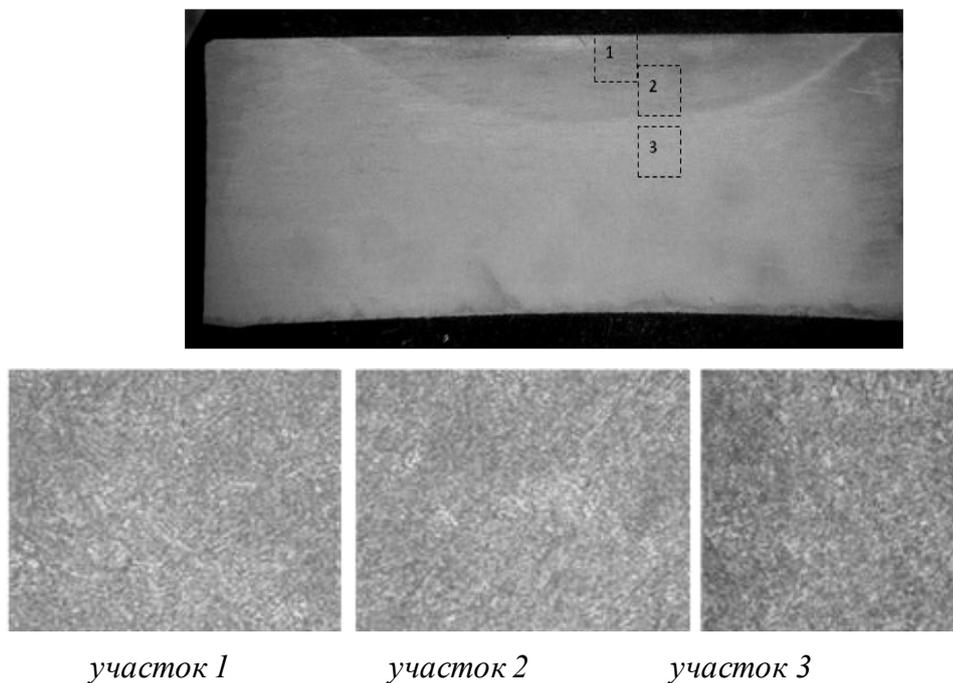
**образец № 2**(рис 4.6 2):одна дорожка шириной 20...23 мм. Изменения рельефа нет, поверхность разных оттенков светло-серого цвета. Изменение цвета наблюдается в виде равномерной пятнистости.

При просмотре макрошлифов под микроскопом было установлено: на всех исследованных образцах имеются следы поверхностного нагрева, зоны нагрева различны по степени изменения структуры, ширине и глубине. Результаты замера геометрических параметров зон приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.6.  
Геометрические характеристики упрочненных зон

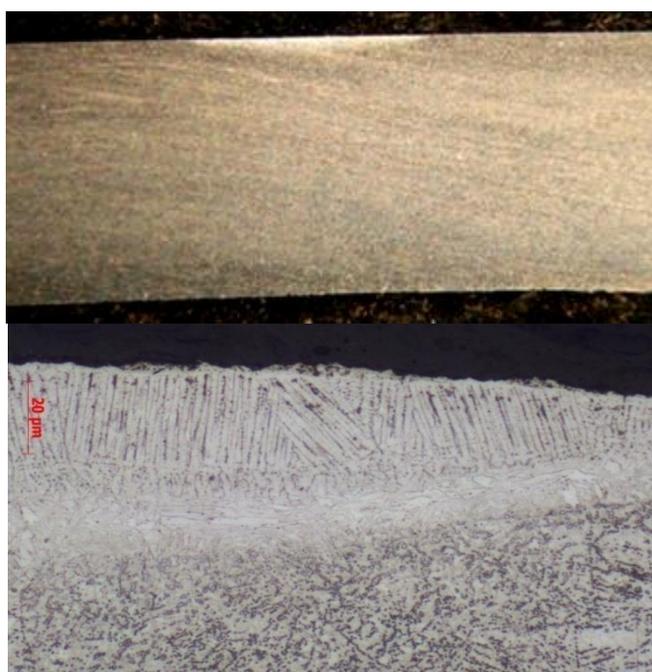
№ образца	Параметры зон, мм	
	глубина упрочненной зоны	ширина ЗТВ
1	расплавления нет, глубина ЗТВ 0,5 мм	15...19
2	расплавления нет, глубина ЗТВ 2,5 мм	21...23

Металлографическое исследование показало следующее: в исходном состоянии структура стали представляет собой сорбит отпуска. Твердость основного материала в районе 15-20 HRC.



*Рис. 4.7. Макро (x8)- и микроструктура (x250) образца обработанного без оплавления поверхности на токе обратной полярности ( $E = 36$  кДж/см).*

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 (рис. 4.7) и следующим распределением твердости по глубине упрочненной зоны (рис. 4.9).



*Рис.4.8. Макро (x8)- и микроструктура (x250) образца обработанного без оплавления поверхности на токе обратной полярности на малых погонных энергиях ( $E = 3$  кДж/см).*

Влияние теплопередачи в изделие за счет катодных пятен на результаты плазменной поверхностной термообработки можно проследить при обработке на малых погонных энергиях (рис. 4.8).

При обработке на токе обратной полярности на малых погонных энергиях удалось получить упрочненный слой глубиной 0.5 мм без видимых следов подплавления и изменения шероховатости поверхности и за счет высокой локализации вводимого тепла со структурой ориентированного мартенсита.

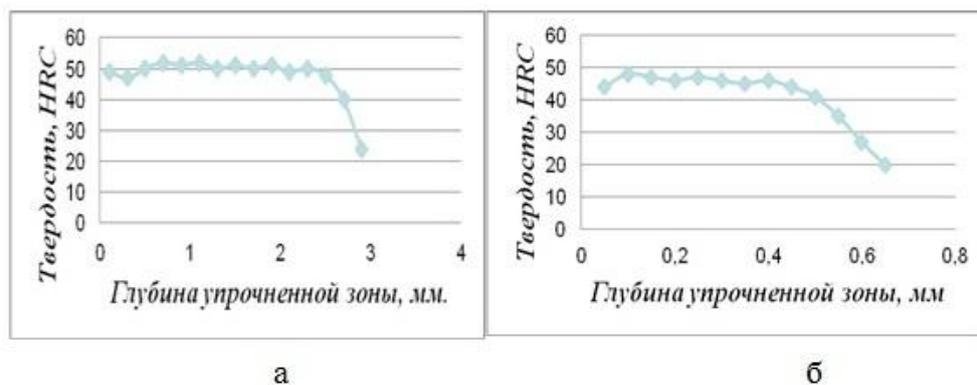


Рис. 4.9. Распределение твердости по глубине упрочненной зоны образца обработанного без оплавления поверхности на токе обратной полярности(а) и образца обработанного на малых погонных энергиях(б).

При таком варианте обработки получаем резкое изменение структуры и свойств тонкого поверхностного слоя с минимальным нагревом изделия вследствие передачи большей части тепловой мощности за счет катодных пятен. За счет высокоскоростного нагрева и охлаждения поверхности небольшой глубины образуется ориентированная мелкодисперсная структура мартенситного типа высокой твердости (рис. 4.9, б).

Таким образом плазменная поверхностная закалка на токе обратной полярности может использоваться для получения упрочненных слоев без оплавления поверхности глубиной около 2 мм, либо для получения тонких упрочненных слое глубиной около 0.25 мм при использовании малоамперной дуги. Кроме того, благодаря высоким градиентам температур создаваемым на поверхности изделия блуждающими катодными пятнами, применение обратной полярности целесообразно в процессах плазменной наплавки для

увеличения ширины наплавляемых валиков и снижения доли участия основного металла в наплавленном.

Эффективность применения упрочнения высококонцентрированными источниками энергии для повышения износостойкости изделий во многом определяется соответствием глубины упрочненной зоны и допустимой величины износа. В некоторых случаях целесообразно применять комплексное упрочнение деталей и изделий, плазменную наплавку однородных, либо разнородных материалов с последующей термообработкой наплавленного слоя. Применение комплексной технологии позволяет в широких пределах регулировать не только геометрические характеристики упрочненного слоя, но и проводить термообработку поверхностного основного материала изделия за счет нагрева плазменной дугой. Благодаря этому удается устранить неравномерность свойств упрочненного слоя, характерную для литой структуры наплавленного слоя, и за счет нагрева поверхности изделия увеличить общую глубину упрочняемого слоя.

#### **4. 4. Сравнительное исследование плазменной наплавки стали 40X13 на токах прямой и обратной полярности**

Плазменная наплавка - это нанесение с помощью сжатой дуги слоя металла на поверхность изделия. Кроме того, за счет нагрева наплавляемой поверхности плазменной дугой происходит ее поверхностная термообработка, что позволяет улучшить эксплуатационные характеристики рабочего слоя[109].

При плазменной наплавке стремятся обеспечить минимальный переход основного металла в наплавленный. При наплавке дугой прямого действия минимальное проплавление основного металла обеспечивается только при относительно малых токах. При плазменной наплавке на прямой полярности существуют недостатки: повышенная степень загрязнения металла наплавки окислами, образующимися во время наплавки. Однако, большинство известных способов плазменной наплавки выполняется на прямой полярности[110].

Между тем, плазменная наплавка на обратной полярности имеет ряд преимуществ: во-первых, катодная очистка, которая обеспечивает хорошую смачиваемость поверхности и растекание наплавляемого металла; во-вторых, – это рассредоточение тепловложения в обрабатываемое изделие, что уменьшает глубину проплавления и увеличивает ширину валика; в-третьих, – это отсутствие внутренних дефектов в наплавленном слое[109 - 111].

И, наконец, существует ряд металлов, на которые в принципе невозможно произвести качественную наплавку на прямой полярности. В первую очередь это цветные металлы и их сплавы.

Ограниченный объем применения дуги обратной полярности объясняется отсутствием надежных плазматронов, предлагаемых промышленностью, для работы на обратной полярности, а также сложившимся мнением о меньшей эффективности процесса наплавки на обратной полярности[112].

Производительность наплавки, ширина наплавляемого слоя за 1 проход, высота наплавленного валика, глубина проплавления основного металла, КПД процесса, дефектность наплавленного слоя зависят от большого количества факторов, в том числе и от полярности тока дуги.

При контакте очищенных поверхностей с атмосферой на них происходит быстрое повторное образование окисной пленки вследствие высокого сродства к кислороду. Поэтому удаление окисла предпочтительней проводить непосредственно в процессе сварки (наплавки), а зону обработки необходимо защищать от окисления вновь, пока не произойдет образование соединения. Использование обратной полярности при плазменной обработке металлов дает такую возможность. На изделие воздействуют сжатой дугой обратной полярности (изделие при этом является катодом), зона обработки защищается подачей аргона через защитное сопло плазматрона.

Большим преимуществом наплавки на обратной полярности также является рассредоточение тепловложения в обрабатываемое изделие, что позволяет уменьшить глубину проплавления и увеличить ширину валика[113].

Технологическими параметрами режима плазменной наплавки являются: величина и полярность тока наплавки, расход плазмообразующего и защитного газов, скорость перемещения плазмотрона относительно изделия (либо наоборот), скорость подачи присадочной проволоки.

Для проведения исследований наплавки на обратной полярности выбираем наиболее простую схему плазменной наплавки дугой прямого действия с подачей обесточенной присадочной проволоки (рис. 4.10),

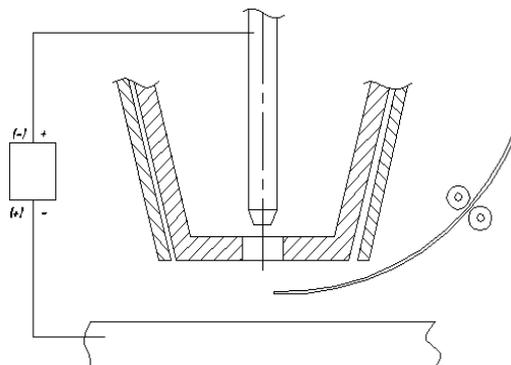


Рис.4.10. Схема наплавки дугой прямого действия

используя следующие режимы:

Таблица 4.7.

Режимы плазменной наплавки.

№ образца	$I_0, A$	$V_{пер}, м/ч$	$G_n, л/мин$	$G_з, л/мин$
1	180	8,4	3,8	5,5

Изделие представляет собой каток диаметром 240 миллиметров (Рис. 4.11). Вес изделия более 200 кг. Марка проволоки и материала изделия - сталь 40X13.

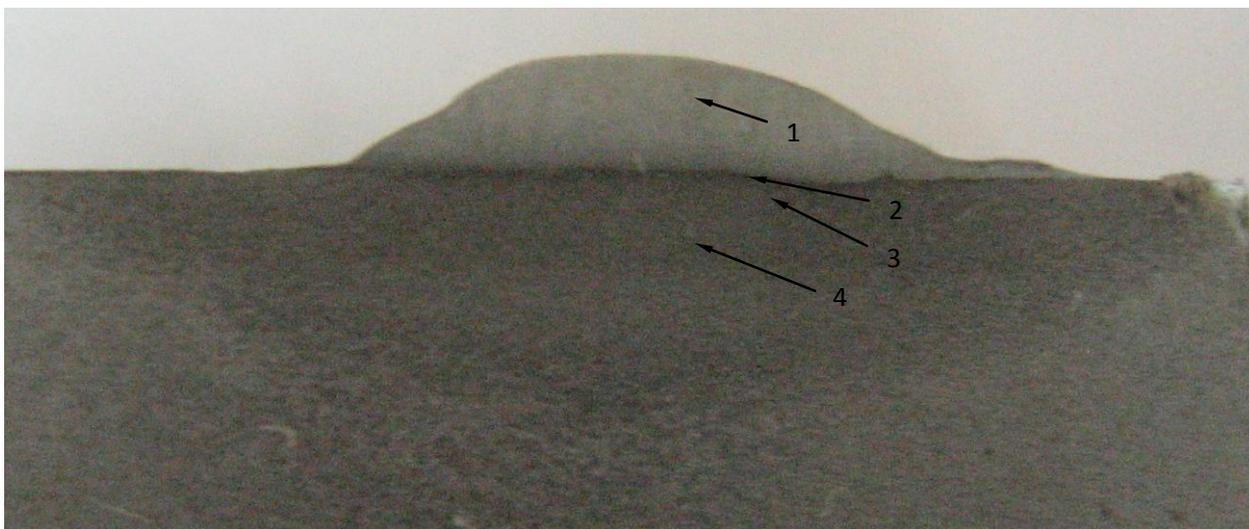


Рис. 4.11. Внешний вид изделия с наплавленным слоем стали 40X13 на токе обратной полярности.

Качество подготовки поверхности изделия под наплавку достаточно плохое, в то же время требования после наплавки очень высокие, как по чистоте, так и по точности.

Также, благодаря эффекту катодной отчистки, снижаются затраты времени и средств на подготовку поверхности изделия под наплавку, вследствие чего увеличивается производительность наплавки.

Проведенное металлографическое исследование позволило получить следующие результаты (рис 4.12):

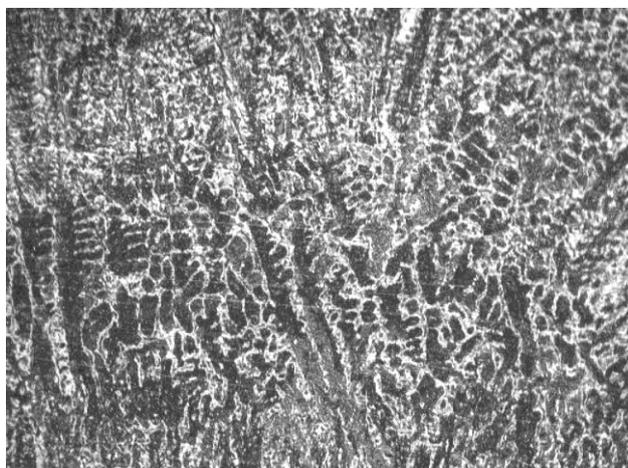


*Рис. 4.12. Макрошлиф(х8) наплавленного валика на токе обратной полярности.*

По результатам анализа макроструктуры наплавленного металла установлено: ширина наплавки за один проход – 24,5мм, высота наплавки – 3,7мм, глубина проплавления основного металла – 0,4...0,5 мм.

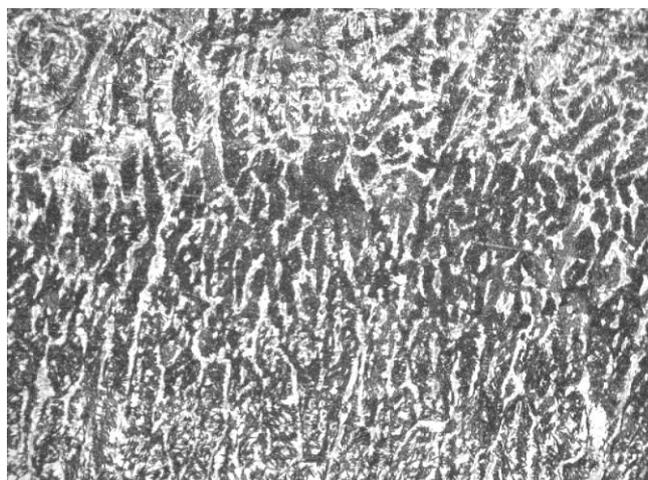
При анализе микроструктуры основных зон наплавки установлено:

Наплавленный металл имеет структуру литого материала ячеисто-дендритного строения, что типично для сварных швов. У линии сплавления дендриты имеют ветви первого порядка, с ориентацией в сторону теплоотвода, по мере удаления от линии сплавления отмечается рост ветвей второго порядка. Структура наплавленного металла представляет собой дендритную структуру мартенситного типа (рис. 4.13).

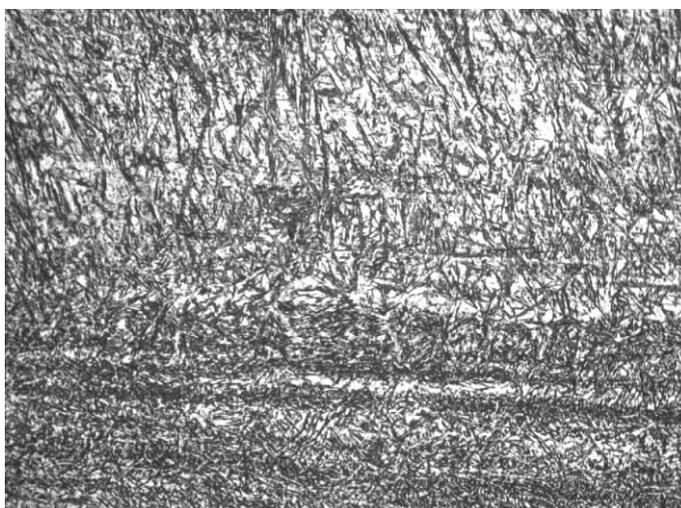


*Рис. 4.13. Структура наплавленного металла - Участок №1 (x400).*

Структура участка №2 – линии сплавления представляет собой структуру отпускаемого мартенсита с границами аустенитных зерен. Ширина линии сплавления составляет 0.25... 0.55 мм (рис. 4.14).



*Рис. 4.14. Структура линии сплавления - Участок №2 (x400).*



*Рис. 4.15. Структура ЗТВ за линией сплавления - Участок №3 (x400).*

Структура начального участка ЗТВ расположенного непосредственно за линией сплавления представляет собой мартенсит с выделениями

аустенитных зерен. Глубина данной зоны составляет около 0,86 ... 1, 2 мм (рис. 4.15).



Рис. 4.16. Структура ЗТВ - Участок №4 (x400).

Структура участка №4 – зоны термического влияния представляет собой зернистый перлит (рис. 4.16).

Структура основного материала представляет собой сорбит отпуска.

Результаты замера микротвердости зон представлены в таблице:

Таблица 4.8

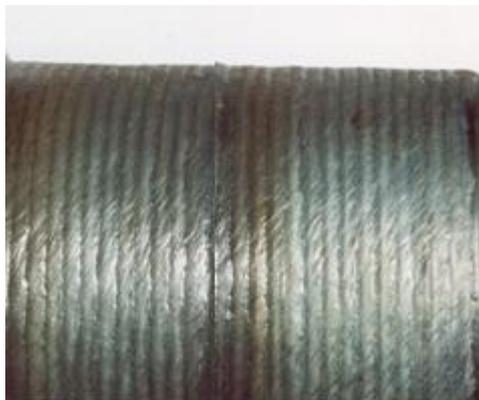
Результаты замера микротвердости основных зон образца №1

№ образца	микротвердость по зонам, $H_{\mu 50}$ , кгс/мм <sup>2</sup>			
	Наплавленный материал (1)	Линия сплавления (2)	ЗТВ(3,4)	основной материал
1	544 ... 586	492 ... 542	460 ... 542	207 ... 215

Валик, наплавленный на прямой полярности, имеет меньшую ширину чем валик наплавленный на обратной. При наплавке на обратной полярности энергия концентрируется на поверхности металла [114]. Другими словами, доля участия основного металла в наплавленном при наплавке на прямой полярности заметно выше, чем на обратной. Между тем, на сегодняшний день примерно 80 % операций плазменной наплавки в РФ производят на прямой полярности. Связано это с нагрузкой на плазмотрон, которая при

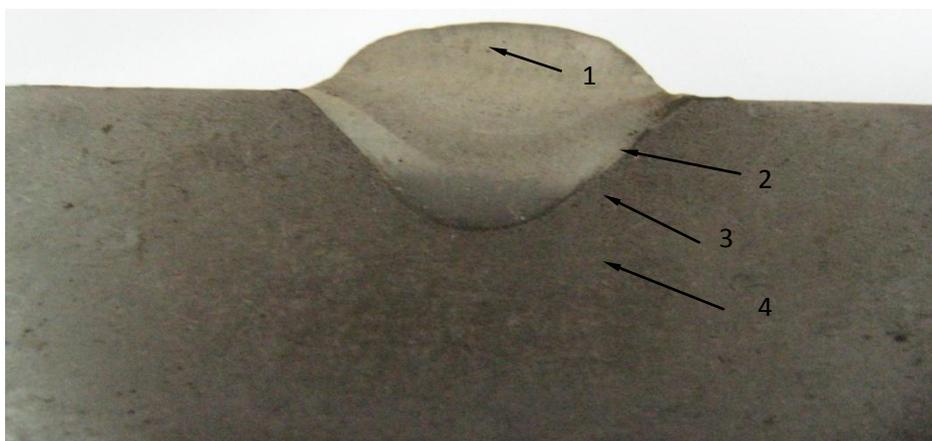
плазменной наплавке на прямой полярности значительно меньше, чем на обратной [112, 115].

Для проведения сравнительных исследований наплавки на прямой полярности использовались изделие (рис. 4.17) и режимы аналогичные наплавке на обратной полярности (табл. 4.7).



*Рис. 4.17. Внешний вид изделия с наплавленным слоем стали 40X13 на токе прямой полярности.*

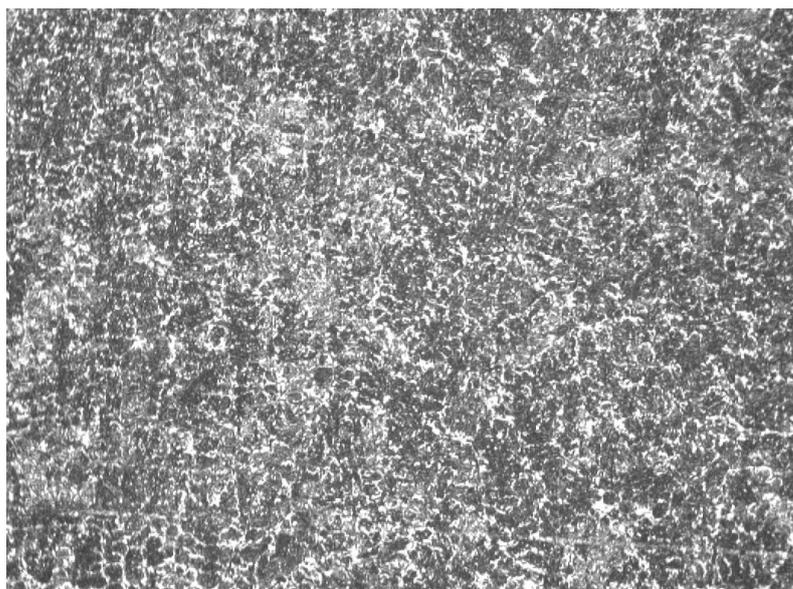
Проведенное металлографическое исследование с использованием аналогичного оборудования позволило установить следующее (рис. 4.18):



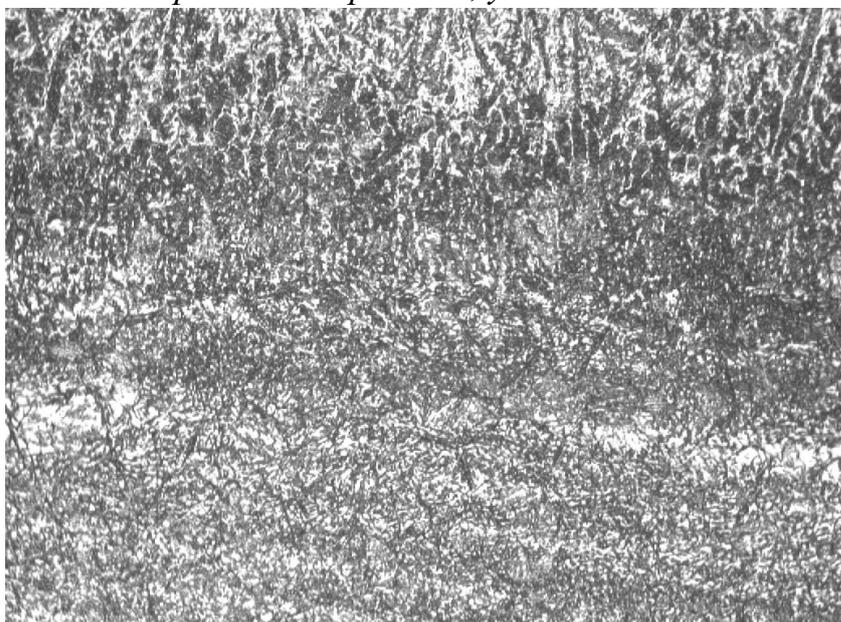
*Рис. 4.18. Макрошлиф (x8) наплавленного валика на токе прямой полярности.*

Ширина наплавки за один проход – 12,5мм, высота наплавки – 3,2мм, глубина проплавления основного металла – 1,7мм. В отличие от наплавки на обратной полярности наплавленный валик имеет меньшую ширину, но чуть большую высоту. Глубина проплавления основного материала при этом ощутимо больше.

Аналогично образцу, наплавленному на обратной полярности, структура наплавленного металла представляет собой дендритную структуру мартенситного типа с выделением дельта-феррита (рис. 4.19).



*Рис. 4.19. Микроструктура (x400) наплавленного валика на токе прямой полярности, участок №1.*

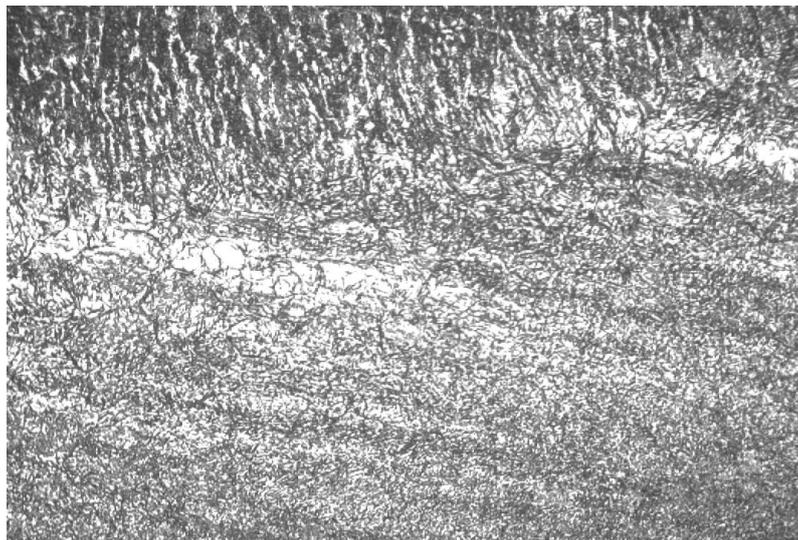


*Рис. 4.20. Микроструктура (x400) линии сплавления, участок №2.*

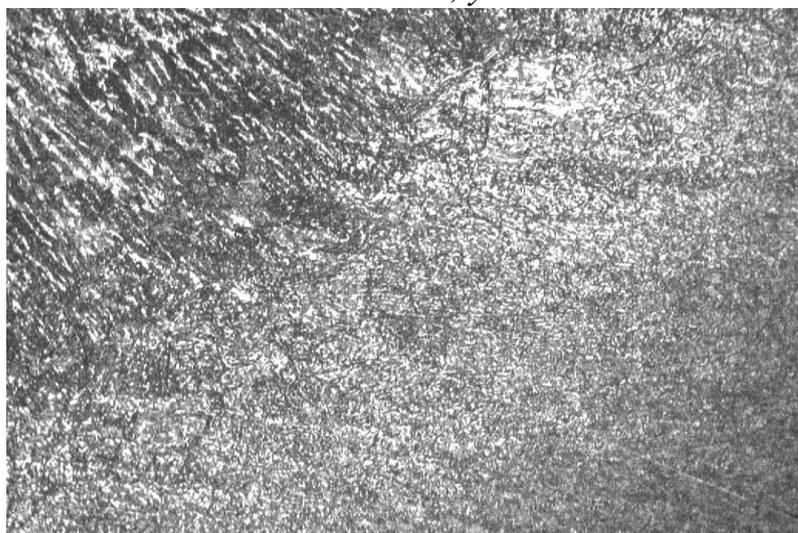
Структура участка №2 – линии сплавления представляет собой структуру отпускаемого мартенсита с границами крупных аустенитных зерен (рис. 4.20).

Структура начального участка ЗТВ расположенного непосредственно за линией сплавления представляет собой мартенсит с выделениями аустенитных зерен. Глубина данной зоны составляет около 1,06 ... 1,25 мм

(рис. 4.21). Структура зоны термического влияния (рис. 4.22) представляет собой перлит. Глубина ЗТВ составляет около 2.85 мм.



*Рис. 4.21. Микроструктура(х400) начала ЗТВ непосредственно за линии ей сплавления, участок №3.*



*Рис. 4.22. Микроструктура(х400) ЗТВ, участок №4.*

Результаты замера микротвердости зон представлены в таблице 4.9:

Таблица 4.9

Результаты замера микротвердости основных зон образца №2

№ образца	Микротвердость по зонам, $H_{\mu 50}$ , кгс/мм <sup>2</sup>			
	Наплавленный материал(1)	Линия сплавления(2)	ЗТВ(3,4)	Основной материал
2	525...564	547...570	432 ... 538	207 ... 215

Как было отмечено ранее, получение упрочненного слоя требуемых характеристик возможно и с помощью наплавки, причем, как видно из

опытов, 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.

#### **4.5. Механические свойства стали 40X13 после плазменной поверхностной термообработки.**

Структура упрочненного слоя металла, характеризующаяся высокой твердостью, оказывает определенное влияние на изменение не только износостойкости, но и других механических свойств: прочности, пластичности, выносливости, трещиностойкости, тепло- и коррозионной стойкости, ударной вязкости.

*Испытания на трещиностойкость* проведенные по методике, изложенной в работах [8,116] показали, что трещина зарождается, растет в закаленной зоне и останавливается в переходной зоне (более пластичной) упрочненного слоя. Для дальнейшего ее распространения необходимы существенно большие усилия, чем усилия зарождения в закаленном слое. Эффект торможения трещины не приводит к повышению трещиностойкости, из-за недостаточно высокой вязкости разрушения слоя основного металла,

распространенного под упрочненным слоем. Исследование образцов из стали 40X13, упрочненных плазменной дугой прямой и обратной полярности показали следующее: плазменное упрочнение с оплавлением поверхности на токе прямой полярности приводит к повышению трещиностойкости[117], особенно в случае упрочнения с перекрытием дорожек упрочнения на 30, 50, 75 %. Повышение трещиностойкости обусловлено образованием: зоны отпуска (с троститно-сорбитной структурой) в месте перекрытия дорожек упрочнения. Регулируя степень перекрытия и режимы упрочнения, можно получить на рабочей поверхности чередующиеся по определенному закону твердые (хрупкие) и мягкие (пластичные) участки.

**Испытания на ударную вязкость**, проведенные по ГОСТ 9454-60, показали: обработка на токе прямой полярности с оплавлением поверхности снижает ударную вязкость вследствие наличия грубой литой структуры. Благодаря наличию мелкодисперсной структуры при обработке на токе обратной полярности ударная вязкость поверхностного повышается в сравнении с обработкой на прямой.

В сводной таблице 4.10 представлены характеристики трещиностойкости и ударной вязкости поверхностных слоев стали 40X13 упрочненных током прямой и обратной полярности.

Таблица 4.10

Характеристики трещиностойкости и ударной вязкости поверхностного слоя изделия из стали 40X13 после плазменного поверхностного упрочнения

Материал	$K_n$	КС Мдж/м <sup>2</sup>	КС <sub>з</sub> Мдж/м <sup>2</sup>	КС <sub>р</sub> Мдж/м <sup>2</sup>	$v$ м/с	$P_{max}$ кН	$P_c^D$ кН	$K_{1c}^D$ Мпа/м <sup>1/2</sup>
40X13	1,0	0,18	0,14	0,04	250	10,20	9,15	23,3
40X13 (оп)	2,2	0,13	0,10	0,03	240	9,39	8,11	20,6
40X13 (пп)	3,4	0,11	0,07	0,04	240	8,75	7,43	18,9

где:  $K_n = HRC_{упр} / HRC_{исх}$  - степень повышения твердости; КС – ударная вязкость; КС<sub>з</sub> – работа зарождения трещины; КС<sub>р</sub> – работа распространения трещины;  $P_{max}$  – максимальное усилие разрушения;  $P_c^D$  – расчетное разрушающее усилие;  $v$  – скорость распространения трещины;  $K_{1c}^D$  – критический коэффициент интенсивности напряжений.

Формирование изнашиваемой поверхности происходит в результате суммирования различных по интенсивности и видам элементарных актов

разрушения и изменений механических, физико-химических свойств материала, а также под воздействием внешних факторов (среда, температура, давление и т. д.). Совокупность явлений в процессе трения определяет вид изнашивания и его интенсивность. При назначении поверхностной упрочняющей обработки (с целью повышения износостойкости) необходимо установить причину изнашивания.

Под термином изнашивание понимают разрушение поверхности твердого тела, проявляющиеся в изменении его размеров или форм.

Из всех видов изнашивания, встречающегося в промышленности, при эксплуатации ОКОЧ наиболее часто проявляется абразивный износ. Согласно [118 - 120], если абразивное изнашивание наиболее часто вызывает разрушение поверхности детали в результате ее взаимодействия с твердыми частицам.

*Испытание на абразивное изнашивание* проводят по двум схемам взаимодействия поверхности материала с абразивом: при трении и при ударе об абразивную поверхность. Методики испытаний, оборудование подробно изложены в работах [121-123], поэтому нет необходимости их описания, остановимся на результатах испытаний. В качестве критерия оценки износостойкости упрочненных материалов использовалась относительная износостойкость, которая выражается отношением износа эталона к износу (линейному, весовому или объемному) исследуемого образца.

Самый простой способ оценки относительной износостойкости материалов – взвешивание образцов до и после испытания на абразивное изнашивание.

Результаты испытания о неподвижно закрепленный абразив стали 40X13 после плазменного упрочнения представлены на рис. 4.23.

Видно, что результаты испытаний сильно зависят от режимов испытаний на абразивный износ.

С увеличением удельной нагрузки от 0 до 8-10 кгс/см<sup>2</sup> величина износа постепенно возрастает. Дальнейшее увеличение нагрузки приводит к резкому увеличению износа. Оптимальная величина нагрузки на образцах при

дальнейших испытаниях принималась  $6,5 \text{ кг}\text{/}\text{см}^2$ . Скорость скольжения в исследованном диапазоне не оказывает заметного влияния на износ упрочненных образцов.

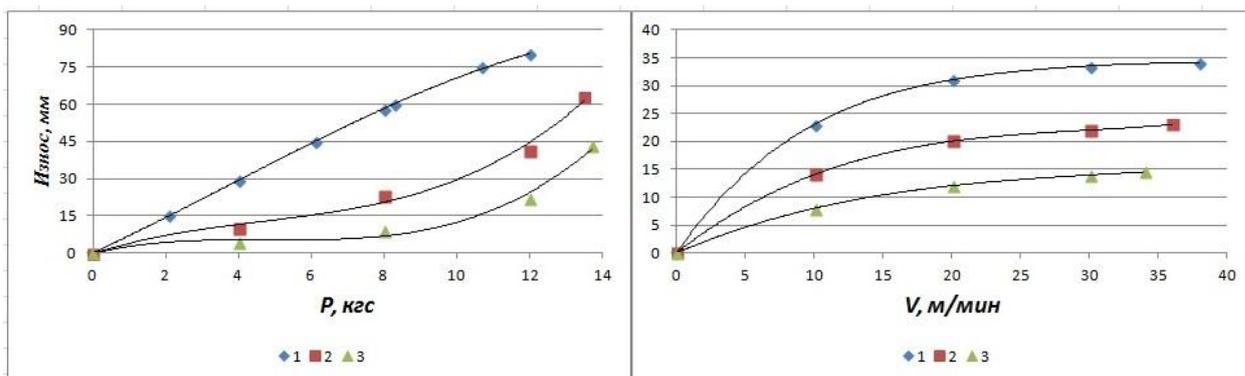


Рис. 4.23. Зависимость износа образцов из стали 40X13 от удельной нагрузки ( $P$ ) и скорости скольжения ( $V$ ) при трении на абразивной поверхности: 1. объемная закалка; 2. плазменная закалка без оплавления поверхности на токе обратной полярности; 3. плазменная закалка с оплавлением поверхности на токе прямой полярности.

Значительный интерес представляет оценка износостойкости сталей после плазменного упрочнения при других схемах взаимодействия с абразивом, а также от вида частиц и их твердости, рис. 4.24.

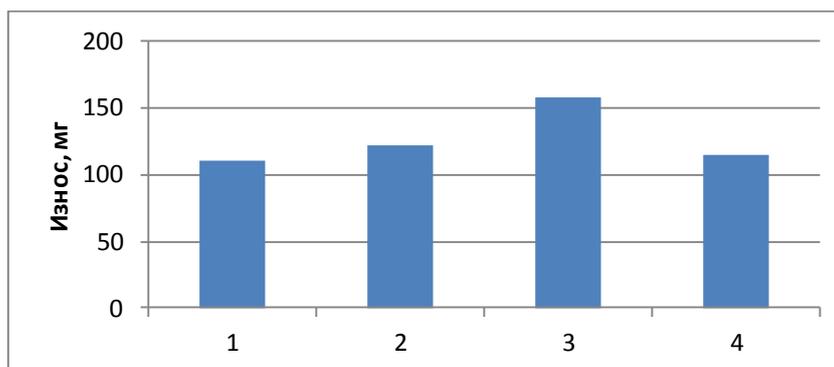


Рис. 4.24. Износостойкость стали 40X13 после плазменной заковки при абразивном изнашивании в зависимости от вида абразива: 1. речной песок; 2. мраморная крошка; 3. гранитная крошка; 4. кварцевый песок

Видно, что схема взаимодействия и вид абразива оказывают заметное влияние на износостойкость упрочненных образцов. Согласно [123] твердость абразивных частиц значительно превышает твердость металла, то износ не зависит от разности твердости. При твердости металлической поверхности превышающей 60 % твердости абразива, износостойкость резко возрастает. Для противодействия основным видам абразивных частиц необходимо

осуществлять легирование поверхности трения. Чем выше твердость карбидов, тем сильнее они противодействуют внедрению абразивных частиц в поверхность.

Приведенные результаты исследований показывают, что плазменное поверхностное упрочнение является эффективным способом увеличения износостойкости рабочих поверхностей тяжело нагруженных изделий, испытывающих различные виды износа.

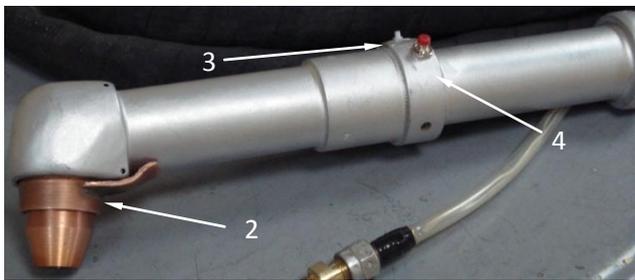
#### **4.6. Разработка схемы технологического процесса плазменной поверхностной закалки.**

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.

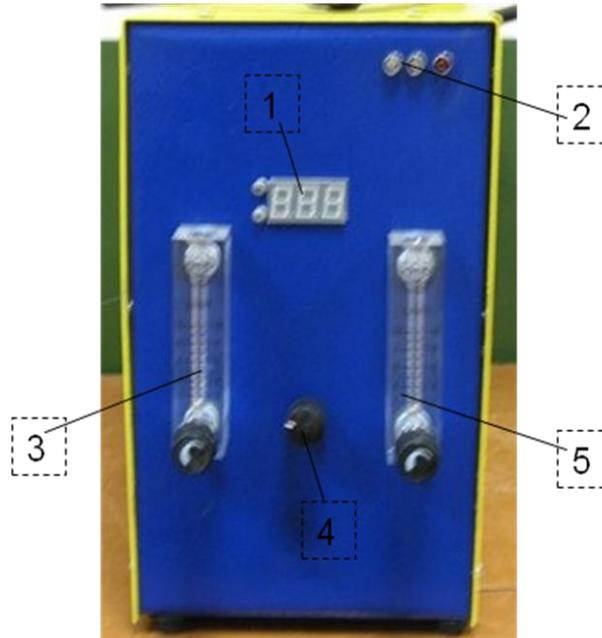
Сущность технологического процесса заключается в следующем:

- Между электродом и обрабатываемой поверхностью детали посредством высокочастотного разряда возбуждается дуга прямой полярности.
- Для формирования сжатой дуги и защиты 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 плазматрона относительно изделия.
- Упрочнение поверхности заданной площади достигается последовательным формированием зон закалки в виде протяженных полос встык по прямой или винтовой линии в зависимости от конфигурации детали.

Технология реализуется с помощью комплекта оборудования (рис. 4.25 – 4.26). В состав комплекта входят : плазменная горелка , блок управления плазменной дугой и источник питания конструктивно объединенные в моноблочную систему, газо- и водяные магистрали.



*Рис.4.25. Плазменная горелка. 1 – плазмотрон; 2 – ручка; 3 – кнопка «пуск»; 4 – тумблер «газ»*

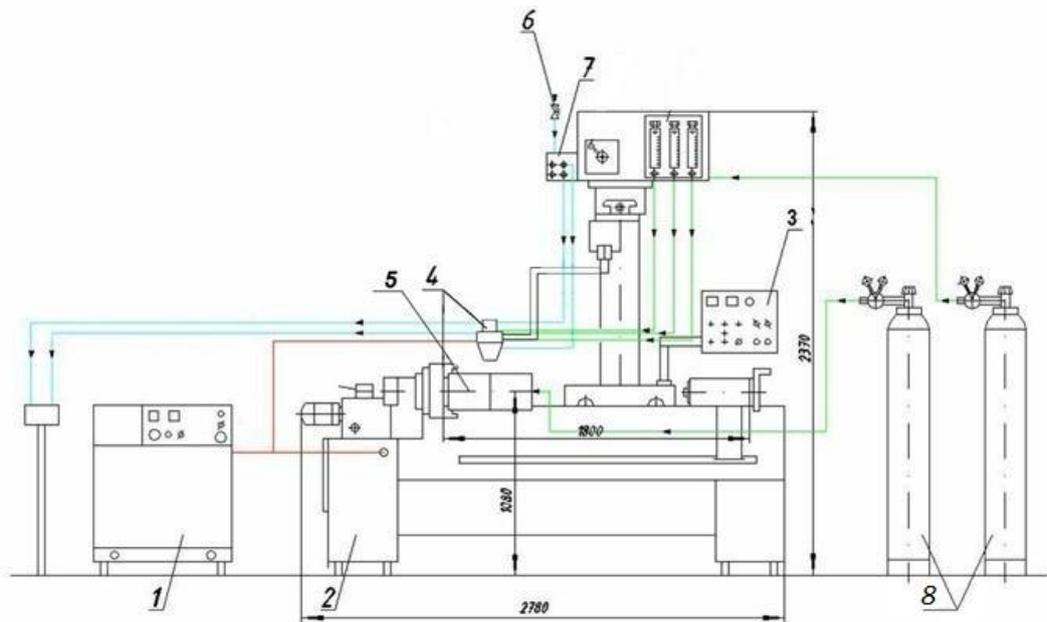


*Рис.4.26. Лицевая панель блока плазменной обработки : 1 – амперметр, 2 – светодиод, 3 – ротаметр защитного газа, 4 – сигнальная лампа, 5 – ротаметр плазмообразующего газа.*

В качестве манипулятора изделия или горелки используется серийное оборудование, обеспечивающее заданные параметры перемещения изделия либо горелки. Размещение элементов и блоков установки в каждом конкретном случае определяется конструкцией серийного механического оборудования, исходя из удобства обслуживания, эксплуатации и требований безопасности.

Перед началом закалки устанавливается необходимая скорость вращения манипулятора (при закалке цилиндрических тел) так, чтобы линейная скорость перемещения обрабатываемой поверхности относительно плазмотрона соответствовала выбранным режимам. При наложении полос по

прямой линии согласно таблице режимов устанавливается линейная скорость перемещения плазмотрона.



*Рис. 4.27. Установка для проведения плазменной поверхностной закалки и наплавки. 1 - источник питания ВД-306Ф; 2-наплавочный станок У-653; 3-пульт управления; 4-плазмотрон; 5-изделие; 6-вентиль; 7-распределитель воды; 8- баллоны с аргонem.*

#### **4.6.1 Техничко-экономическая эффективность плазменного поверхностного упрочнения.**

Как было отмечено ранее основной технологией получения рабочих контактных поверхностей ОКОЧ является наплавка высокопрочных сталей, обеспечивающих высокие значения твердости и имеющих достаточную стойкость против атмосферной коррозии, на более дешевой сердцевину. Применение таких опорных частей, отличающихся высокой надежностью, низки коэффициентом трения, малой материалоемкостью и минимально возможной строительной высотой, позволяет увеличить срок их службы и уравнивать его со сроком эксплуатации моста.

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. Для обоснования целесообразности выбора такой технологии проведем элементарный сравнительный расчет экономической эффективности наплавочных работ и поверхностной термообработки на примере катка.

В настоящее время на предприятии применяется метод полных издержек, или метод Издержки плюс (Full Cost Pricing, Target Pricing, Cost Plus Pricing): к полной сумме затрат (постоянных и переменных) добавляют определенную сумму, соответствующую норме прибыли. За основу берется полная производственная себестоимость, согласно которой, надбавка при формировании цены на выпускаемый продукт (опорные части для мостов) должна покрыть затраты по реализации и обеспечить прибыль. Косвенные налоги, такие как НДС 18%, прибавляются с верху, после расчета общей суммы затрат и закладки нормы прибыли 10-15 %.

$$VC + FC = TC + \text{нац}(10 \div 15\%) \quad (4.2)$$

где:  $VC$  – переменные издержки;  $FC$  – постоянные издержки;  $TC$  – технологическая себестоимость изделия.

К переменным издержкам при производстве ОКОЧ относятся: стоимость материалов и энергоносителей необходимых для изготовления ОКОЧ: стоимость работ по наплавке либо поверхностной термообработки, и дальнейшей механической обработки; налоги; амортизация оборудования. Постоянные издержки как правило составляют примерно 20 % от переменных.

Для начала определим затраты на материалы для двух технологий.

Стоимость заготовок определяется:

$$C_M = mC_M P_{mз} \quad (4.3)$$

где:  $C_M$  - затраты на материал, руб;  $m$  – масса детали, кг;  $C_M$  - цена материала за 1 кг, руб;  $P_{mз}$  – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Отсюда стоимость заготовки из стали 09Г2С составляет:

$$C_{09Г2С} = 3,14 \cdot 0,138^2 \cdot 7800 \cdot 55 \cdot 1,1 = 28220 \text{ руб}$$

Стоимость заготовки из стали 40Х13

$$C_{40Х13} = 3,14 \cdot 0,142^2 \cdot 7800 \cdot 75 \cdot 1,1 = 40720 \text{ руб}$$

В случае использования технологии наплавки к затратам на материалы добавляются затраты на наплавочную проволоку:

$$C_{пр} = k_n m_n C_{пр} P_{тз} \quad (4.4)$$

где:  $C_{пр}$  - затраты на проволоку, руб;  $k_n$  - коэффициент перехода наплавочного материала в наплавленный;  $m_n$  – масса наплавленного металла, кг;  $C_M$  - цена проволоки за 1 кг, руб;  $P_{mз}$  – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Таким образом затраты на проволоку из стали 40Х13 составляют:

$$C_{пр} = 0,93 \cdot \left( \frac{3,14}{4} (0,284^2 - 0,276^2) \cdot 7800 \right) \cdot 520 \cdot 1,2 = 16700 \text{ руб}$$

Поскольку речь идет о плазменной наплавке, поэтому помимо затрат на материал необходимо учитывать затраты на защитные газы. в нашем случае в качестве защитного и плазмообразующего газа использовался аргон. Тогда затраты на защитные газы при наплавке определяются следующим образом:

$$C_{гн} = G_{г} t_o C_{г} P_{тз} \quad (4.5)$$

где:  $C_{гн}$  - затраты на газ при наплавке, руб;  $G_{г}$ - расход газа, л/ч;  $t_o$ - основное время наплавки, ч;  $C_{г}$  - цена газа, применяемого при наплавке руб/л;  $P_{mз}$  – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Основное время наплавки рассчитывается следующим образом:

$$t_o = \frac{60V_{г}}{\alpha_n I} \quad (4.6)$$

где:  $V$  – объем наплавленного металла,  $\text{см}^3$ ;  $\gamma$  – плотность наплавляемого материала,  $\text{г/см}^3$ ;  $\alpha_n$  – коэффициент наплавки,  $\text{г/А}\cdot\text{ч}$ ;  $I$  – ток наплавки,  $\text{А}$ .

Объем наплавленного металла определяется из геометрии упрочненного слоя. Чертеж упрочненного слоя катка ОКОЧ представлен на рисунке:

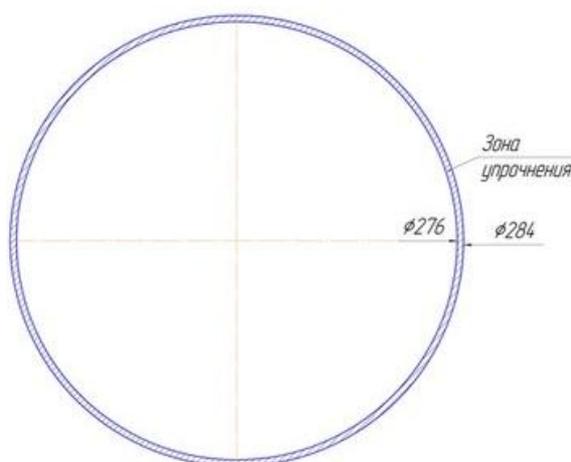


Рис. 4.28. Рабочий слой контактной поверхности катка.

Следовательно, расходы на аргон при наплавке составляют:

$$C_{Ar} = 12 \cdot 6,5 \cdot 123 \cdot 1,1 = 10553 \text{ руб}$$

При плазменной поверхностной закалке в качестве защитного и плазмообразующего газа также используется аргон. Затраты на газ при нагреве рабочей поверхности детали при плазменной закалке определяются следующим образом:

$$C_{гз} = G_3 t_{зак} C_2 P_{мз} \quad (4.7)$$

где:  $C_{гз}$  – затраты на газ при плазменной закалке, руб;  $G_3$  – расход газа, л/ч;  $t_{зак}$  – время закалки одной детали, ч;  $C_2$  – цена газа, применяемого при закалке руб/л;  $P_{мз}$  – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Следовательно затраты на газ при плазменной поверхностной закалке составляют:

$$C_{гз} = 7 \cdot 8 \cdot 123 \cdot 1,1 = 7577 \text{ руб}$$

Помимо затрат на материалы, защитный и плазмообразующие газы, целесообразно сравнить затраты на электроэнергию.

Затраты на электроэнергию при наплавке определим по формуле:

$$C_{\text{ЭН}} = 0,001 \text{Ц}_{\text{Э}} \frac{I_{\text{д}} U_{\text{д}} t_{\text{о}}}{\eta} \quad (4.8)$$

где:  $C_{\text{ЭН}}$  - затраты на электроэнергию при наплавке, руб;  $\text{Ц}_{\text{Э}}$  - тариф на электроэнергию, руб/кВт·ч;  $I_{\text{д}}$  - ток дуги при наплавке, А;  $U_{\text{д}}$  - напряжение дуги, В;  $t_{\text{о}}$  - основное время наплавки, ч;  $\eta$  - КПД источника питания.

Таким образом:

$$C_{\text{ЭН}} = 0,001 \cdot 2 \cdot \frac{180 \cdot 24 \cdot 6,5}{0,75} = 74,89 \text{ руб}$$

Затраты на электроэнергию при плазменной поверхностной закалке выражаются следующим образом:

$$C_{\text{ЭЗ}} = W_{\text{д}} t_{\text{зак}} \text{Ц}_{\text{Э}} \eta_{\text{д}} \quad (4.9)$$

где:  $C_{\text{ЭЗ}}$  - затраты на электроэнергию при закалке, руб;  $W_{\text{д}}$  - мощность плазменной дуги, кВт;  $t_{\text{зак}}$  - время закалки, ч;  $\text{Ц}_{\text{Э}}$  - тариф на электроэнергию, руб/кВт·ч;  $\eta_{\text{д}}$  - КПД нагрева поверхности плазменной дугой.

Следовательно:

$$C_{\text{ЭЗ}} = 4,8 \cdot 8 \cdot 2 \cdot 0,85 = 65,28 \text{ руб}$$

Таким образом затраты на изготовление детали по технологии наплавки без заработной платы составляют:

$$C_{\text{напл}} = C_{\text{о9Г2С}} + C_{\text{пр}} + C_{\text{Ar}} + C_{\text{ЭН}} \quad (4.10)$$

$$C_{\text{напл}} = 28220 + 16700 + 10553 + 74,89 = 55548 \text{ руб}$$

Аналогично затраты на изготовление катка с использованием плазменной поверхностной закалки составляют:

$$C_{\text{зак}} = C_{\text{40X13}} + C_{\text{Гз}} + C_{\text{ЭЗ}} \quad (4.11)$$

$$C_{\text{зак}} = 40720 + 7577 + 65,28 = 48362 \text{ руб}$$

Цель ценовой политики предприятия ООО «Альфатех» - максимизация прибыли, что в свою очередь подразумевает сокращение издержек.

Пример формирования цены биметаллических катков ОКОЧ, изготовленных с применением наплавки, и металлических катков ОКОЧ подвергнутых плазменному поверхностному упрочнению представлен в таблице 4.11

Таблица 4.11  
Сводная калькуляция

Марка катка опорной части/Виды затрат	Сумма, руб. на 1 шт.	Кол-во, шт.	Цена договора
<b>Каток ОКОЧ 09Г2С + 40Х13/ Переменные затраты:</b>			
Услуги подрядных организаций по переработке давальческих материалов и сборке готовой продукции	91755	18	
Материальные затраты	<b>55548</b>		
Общепроизводственные расходы (наемный транспорт)	1 000		
Затраты по разработке проекта	<b>6611</b>		
Затраты по осуществлению технического контроля качества опорных частей	<b>3 015</b>		
<b>Каток ОКОЧ 09Г2С + 40Х13/ Постоянные затраты:</b>			
АУП (на срок выполнения заказа - 3 месяца)	17067		
<b>Итого</b>	174 996		
Прибыль 12-13 % *	23 236		
<b>Цена продажи</b>	<b>197 745</b>		<b>3 798 000</b>
НДС, 18%	35 594		683 640
<b>Цена продажи с НДС</b>	<b>233 339</b>		4 481 640
<b>Каток ОКОЧ 40Х13 / Переменные затраты:</b>	Сумма, руб. на 1 шт.	Кол-во, шт.	Цена договора
Услуги подрядных организаций по переработке давальческих материалов и сборке готовой продукции	69960	18	
Материальные затраты	<b>48362</b>		
Общепроизводственные расходы (наемный транспорт)	1 000		
Затраты по разработке проекта	<b>24 226</b>		
Затраты по осуществлению технического контроля качества	<b>2 895</b>		

опорных частей			
<b>Каток ОКОЧ 40X13/ Постоянные затраты:</b>			
АУП (на срок выполнения заказа - 3 месяца)	14 788		
<b>Итого</b>	<b>161 231</b>		
Прибыль 13-14 % *	22 572		
<b>Цена продажи</b>	<b>183 803</b>		<b>3 654 000</b>
НДС, 18%	33 084		657 720
<b>Цена продажи с НДС</b>	<b>216 887</b>		<b>4 311 720</b>

По данным бухгалтерского учета выручка от реализации составила 17 627 784-00 рубля (включая НДС 18% - 2 688 984-00).

Таблица 4.12

Реализованная продукция за I-е полугодие 2009 г.

Договор	Дата реализации	Наименование продукции	Кол-во, шт	Сумма, руб включая НДС 18%
АТ/190	10.03.09	972 КМД -102.02	8	660800,00
		972 КМД -103.02	8	660800,00
АТ/183	20.03.09	1004 КМД – 102.015	3	236826,00
		1004 КМД – 101.015	2	143016,00
		1004 КМД – 102.04	2	226796,00
		1004 КМД – 101.04	4	391760,00
		1004 КМД – 103.04	1	76700,00
АТ/169	31.03.09	941 КМД - 102.01(006)	1	304912,00
		941 КМД - 101.01(006)	2	647820,00
АТ/188	14.04.09	1026 КМД -102.05	1	121186,00
		1025 КМД -101.06	1	132042,00
		1024 КМД -101.05	1	117646,00
		1024 КМД -101.06	1	98766,00
		1024 КМД -103.06	1	94164,00
		1024 КМД -102.06	2	244496,00
		1025 КМД -102.06	1	133576,00
		1025 КМД -101.05	1	89916,00
		1024 КМД -101.05	1	81420,00
		1025 КМД -103.06	1	107852,00
		1025 КМД -102.05	1	89208,00
11-01/06-2009	14.04.09	1029 КМД -102.05	1	134874,00
		1029 КМД -101.06	1	137116,00
		1026 КМД -102.05	1	121186,00
		1025 КМД -101.06	1	132042,00

		1029 КМД -102.06	1	148090,00
		1029 КМД -101.05	1	108914,00
		1025 КМД -102.06	1	133576,00
		1025 КМД -101.05	1	89916,00
АТ/196 Доп. Согл. №1	29.05.09	993 КМД-102.04	1	114460,00
		993 КМД-101.04	1	95580,00
<b>*АТ/193</b>	<b>19.06.09</b>	<b>1040 КМД - 102.05(006)</b>	<b>8</b>	<b>4481640,00</b>
		<b>1040 КМД - 103.05(006)</b>	<b>8</b>	<b>4311720,00</b>
АТ/196 Доп. Согл. №2	30.06.09	1027/1 КМД-102.03	8	1029904,00
		1027/1 КМД-103.03	8	890192,00
		1027 КМД-102.03	2	257476,00
		1027 КМД-102.04	2	288156,00
		1027 КМД-103.03	2	222548,00
		1027 КМД-103.04	2	270692,00
Итого:				17 627 784- 00

**\*Формирование цены рассмотрено на примере данного договора**

Сокращенная производственная себестоимость составила 11 931 203 – 90 рублей.

Операционная прибыль – более 3 миллионов рублей, прибыль до выплаты налогов и процентов – более одного миллиона рублей. Чистая прибыль – девятьсот пятьдесят две тысячи рублей.

Расчет точки безубыточности в денежном выражении:

$$S_{BE} = FC / [1 - (VC/S)] \quad (4/12)$$

где:  $S_{BE}$  – выручка без НДС;  $FC$  – постоянные издержки (АУП офис);  $VC$  -совокупные переменные издержки (материалы, услуги подрядных организаций).

$$S_{BE} = 1\,756\,656,19 / [1 - (11\,931\,203,90 / 14\,938\,800,00)] = 8\,365\,029,47$$

Исходя из проведенного сравнения, 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 более простую 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.

#### **Выводы по главе 4:**

1. Установлено, что получение упрочненных слоев глубиной более 4 мм плазменной поверхностной термообработкой изделий из высоколегированных коррозионно-стойких сталей возможно лишь с оплавлением поверхности. Определены оптимальные режимы плазменной закалки с оплавлением поверхности.
2. Проведены сравнительные исследования влияния параметров режима плазменной поверхностной термообработки стали 40X13 на токе прямой и обратной полярности на структуру и свойства упрочненной зоны. Установлено, что при всех вариантах обработки на токе прямой полярности наблюдается увеличение твердости обработанной зоны (от 15-20 HRC в исходном состоянии до 56 HRC в упрочненной зоне). Показана возможность регулирования геометрии упрочненного слоя в достаточно широких пределах: от 8 до 12 мм в ширину и от 2 до 4,5 мм в глубину. При этом после закалки рекомендован низкотемпературный отпуск с целью снятия остаточных напряжений.
3. Установлено, что плавное убывание твердости (от 56 до 42 HRC) по сечению упрочненного слоя, объясняется различными структурными составляющими зоны литой структуры, зоны закалки из твердой фазы и переходной зоны.
4. Плазменная поверхностная термообработка на токе обратной полярности, позволяет получать упрочненные слои следующего диапазона геометрических характеристик (от 15 до 25 мм в ширину и от 0,45 мм до 2 мм в глубину) без оплавления поверхности. При таком варианте термообработки происходит равномерный нагрев по ширине

упрочненной зоны и, за счет катодных явлений на поверхности изделия, обеспечиваются высокие скорости нагрева и охлаждения необходимые для проведения закалки поверхности. При обработке на токе обратной полярности без оплавления поверхности удается получить мелкодисперсную мартенситную структуру упрочненного слоя твердостью около 50 HRC не требующую дальнейшей термической и механической обработки.

5. Применение обратной полярности позволяет производить плазменную поверхностную термообработку при пониженных погонных энергиях плазменной дуги. Явление блуждания катодных пятен по поверхности изделия позволяет расширить зону обработки и обеспечить равномерный нагрев обрабатываемой поверхности без применения специальных сканирующих механизмов.
6. Требуемые характеристики рабочего слоя могут достигаться плазменной наплавкой материала аналогичного основному. При этом 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 слои высокой твердости (52 - 60 HRC) глубиной свыше 5 мм. При одинаковых толщинах наплавляемого металла в зависимости от полярности меняется ширина наплавленного валика (от 12 – 15 мм на прямой до 19 – 23 мм на обратной) и глубина проплавления основного металла (от 1,2 – 1,7 мм на прямой до 0,25 – 0,6 мм на обратной).
7. Проведенные испытания на износостойкость и ударную вязкость показали, что плазменное поверхностное упрочнение является эффективным способом увеличения износостойкости, однако обработка на токе прямой полярности с оплавлением поверхности снижает ударную вязкость вследствие наличия грубой литой структуры. Благодаря наличию мелкодисперсной структуры при

обработке на токе обратной полярности ударная вязкость поверхностного повышется в сравнении с обработкой на прямой.

8. Применение технологии плазменного поверхностного упрочнения позволяет снизить почти на 20% затраты на материалы и энергоносители при изготовлении изготовления 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 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.

## Список литературы

1. Егоров А.А., Коровин А.И. Плазменная поверхностная закалка в машиностроении // М., Машиностроение, 1961, 106 с..
2. Патон Б.Е. Проблемы сварки на рубеже веков // Автоматическая сварка. – 1999. - №1. С. 4-14.
3. Пузряков А.Ф. Новые разработки и перспективы использования плазменных технологий // Сварочное производство. – 1997. - №2. С. 21-25.
4. Балановский А.Е. Развитие плазменных технологий: сварка, наплавка, упрочнение, резка // Сварка в Сибири. – 2000. - №2. – С. 8-19.
5. Щицын Ю. Д. Плазменные технологии в сварочном производстве. – Ч. 1 // Перм. гос. техн. ун-т. Пермь, 2004, 73 с.
6. Смирнов В.В., Роговой М.Д., Повстан В.И. Работы института сварки России в области плазменного оборудования и технологий // Сварка в Сибири. – 2001. - №1. – С. 25 -28.
7. Плазменная технология. Опыт разработки и внедрения. – Л.: Лениздат, 1980. – 152 с.
8. Плазменное поверхностное упрочнение // Л.К. Лещинский, С.С. Самогутин, И.И. Пирч, В.И. Комар. – К.: Тэхника, 1990. – 109 с.
9. Быховский Д.Г., Беляев В.М. Энергетические характеристики плазменной дуги при сварке на обратной полярности // Автоматическая сварка. 1971. - №5. - С.27-30.
10. Исхаков Г.Г., Гапченко М.Н., Фесан В.П. Тепловой баланс микроплазменной дуги обратной полярности при сварке тонколистовых алюминиевых сплавов // Сварочное производство. 1981. - №1. - С.2-4.
11. Полосков С.И. Особенности разрушения вольфрамовых электродов при сварке стабилизированной дугой обратной полярности // Сварочное производство. – 1985. - №9. – с. 14-16.

12. Сафонов Е.Н. Новые материалы и технологические процессы для продления ресурса прокатных валков // Е.Н. Сафонов. – Нижний Тагил: НТИ(ф) УГТУ – УПИ, 2005. – 212 с.
13. Богданов В.И., Ткаченко С.С., Шульман С.А. Опорные части мостов: учебное пособие ч.1 // Спб. Петербургский гос. Университет путей сообщения, 2006 – 32 с.
14. Богданов В.И., Ткаченко С.С., Шульман С.А. Опорные части мостов: учебное пособие ч.2 // Спб. Петербургский гос. Университет путей сообщения, 2006 – 33 с.
15. ГОСТ Р 53628 – 2009. Опорные части металлические катковые для мостостроения.
16. Каленский В.К., Дворецкий В.И., Буга В.М., Семенихин А.В. Разработка материалов и технологии изготовления однокатковой опорной части мостов использованием наплавки // Автоматическая сварка №5 – 2001. – с. 26 – 31.
17. Хрущов М.М. Износостойкость твердых наплавов // М. Машиностроение. – 1971. – 95 с.
18. Кулиш В.И. Повышение эксплуатационной надежности сталежелезобетонных мостов // М. Транспорт. – 1992. – 108 с.
19. Осипов В.О., Храпов Б.В., Мосты и тоннели на железных дорогах // М. Транспорт. – 1988. – 366 с.
20. Белинин Д.С., Щицын Ю.Д. Особенности структурообразования при плазменной поверхностной закалке на большую глубину изделий из стали 40Х13 // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012, Т 14, №4(5). с. 1202 – 1205.
21. Лившиц Л.С. Металловедение для сварщиков. // М. Машиностроение 1979. – 253 с.
22. Лившиц Л.С., Хакимов А.Н. Металловедение сварки и термическая обработка сварных соединений. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1989. – 336 с.: ил.

23. Материаловедение и технология металлов: Учеб. Для студентов машиностроит. спец. Вузов // Г.П. Фетисов, М.Г. Крпман, В.М. Матюнин и др.; под ред. Г.П. Фетисова – 3-е изд., испр и доп. – М.; Высш. Шк., 2005. – 862 с.; ил.
24. Жаропрочные стали и сплавы // Справочное издание. Масленков С.Б. М.: Металлургия, 1983. 192 с.
25. ГОСТ 5632-72 Стали высоколегированные и сплавы коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные.
26. Металловедение и термическая обработка стали // Справочник под ред. Бернштейна М.Л., Рахштадта А.Г. М.: Металлургия, 1983. - 352с.
27. Коррозионностойкие, жаростойкие и высокопрочные стали и сплавы: справ. изд.// А.П. Шлямнев и др. – М.: «Интермет инжиниринг». 2000. 232 с.
28. Гольдштейн М.И., Грачев С.В., Векслер Ю.Г. Специальные стали // М. Металлургия 1985. – 408 с.
29. Теория термической обработки металлов. Учебник. Изд. 3-е, испр. и доп. Новиков И.И. М., «Металлургия», 1978. 392 с.
30. Войнов Б.А. Износостойкие сплавы и покрытия. – М.: Машиностроение, 1980. – 120 с.
31. Зубченко А.С. Хрупкость хромистых ферритных сталей при сварочном и печном нагреве // Сварочное производство, 1981 – с. 26-28.
32. Макаров Э.Л. Холодные трещины при сварке легированных сталей // М.: Машиностроение, 1981. – 248 с.
33. Сварка и свариваемые материалы Т.1. свариваемость материалов // под ред. Э.Л. Макарова. М.: Металлургия. 1991. 528 с.
34. Дровозов Г.П., Рахманов В.И., Гуревич Ю.Г. Поверхностное упрочнение деталей машин: учеб. Пособие. – курган, КГУ, 1997. – 115 с.

35. Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Анищенко Л.М. Высокотемпературные технологические процессы: Теплофизические основы // М.: Наука, 1985. – 172 с.
36. Балановский А.Е. Плазменное поверхностное упрочнение металлов // Иркутск. Изд-во ИрГТУ. – 2006 – 180 с.
37. Масленков С.Б., Ляпунов А.И., Зинченко В.М. Энциклопедический справочник термиста-технолога: В 3 т. // М.: Наука и технологии, 2004. – 608 с.
38. Евсеев Г.Б., Глизманенко Д.Л. Оборудование и технология газопламенной обработки // Учебник для студентов вузов. М.: Машиностроение, 1974. – 312 с.
39. Болховитинов Н.Ф. Металловедение и термическая обработка // 5-е изд. Перераб и доп. – М.: Машиностроение, 1961. – 463 с.
40. Абраимов Н.В., Елисеев Ю.С. Химико-термическая обработка жаропрочных сталей и сплавов // М.: Интермет Инжиниринг, 2001. – 622 с.
41. Лесков Г.И. Источники нагрева при сварке // Сварка в СССР. – М.: Наука, 1981 – Т.2. - с 7 – 27.
42. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов // Под общ. ред. Рыкалина Н.Н. М.: Машиностроение, 1985. - 496 с.
43. Андрияхин, В.М. Процессы лазерной сварки и термообработки // М.: Наука, 1988. 171 с.
44. Рыкалин Н.Н. и др. Лазерная обработка материалов. // М., «Машиностроение», 1975. – 220 с.
45. Степанова, Т.Ю. Технологии поверхностного упрочнения деталей машин: учебное пособие // Иван. гос. хим.-технол. ун-т.-Иваново, 2009.- 64с.- ISBN – 5-9616-0315-4.
46. Коротков В.А. Совершенствование дуговой закалки // Тяжелое машиностроение. 2004. - №6. - С. 34-37.

47. Цветков, Ю.В. Низкотемпературная плазма в процессах восстановления // Ю.В. Цветков, СЛ. Панфилов. М.: Наука, 1980. - 359 с.
48. Донской, А.В. Электроплазменные процессы и установки в машиностроении // А.В. Донской, В.С. Клубникин. Л.: Машиностроение, 1979. - 221 с.
49. Самогутин С.С. Оптимизация режимов плазменной обработки инструмента // Сварочное производство. 1998. - № 7. - С. 12-15.
50. Демин, Ю.Н. Теоретическое исследование процесса плазменного термоупрочнения поверхности металлов и сплавов // Заготовительные производства в машиностроении. 2003. - №5. - С. 46-49.
51. Эсибян Э.М. Плазменно-дуговая аппаратура // Киев: Техника. - 1971. - 164 с.
52. Жуков М.Ф., Смоляков В.Я., Урюков Б.А. Электродуговые нагреватели газа (плазматроны) // М.: Наука, - 1973. - 237 с.
53. Лещинский Л.К., Самогутин С.С., Пирч И.И. Влияние технологии поверхностного упрочнения высококонцентрированным источником нагрева на структуру и трещиностойкость наплавленного материала и углеродистых сталей // Сварочное производство. – 1987. - № 5. – с. 3-6.
54. Самогутин С.С., Нестеров О.Ю., Кирицева Т.А. Механические свойства инструментальных сталей после плазменной поверхностной обработки // Физика и химия обработки материалов. 2002. - №1. - С. 65-71.
55. Самогутин, С.С. Плазменная обработка инструментальных сталей // Автоматическая сварка. 1996. - № 8. - С. 48-51.
56. Металловедение и термическая обработка стали // Справочник под ред. Бернштейна М.Л., Рахштадта А.Г., М.: Металлургия, - 1983. - 352с.
57. Будовских Е.А. Основы технологии обработки поверхности материалов гетерогенной плазмой // Сиб. гос. индустриальный ун-т. Новокузнецк : Изд-во СибГИУ, - 2002. - 170 с

58. Низкотемпературная плазма // Справочник в 4-х Т., Новосибирск: Наука, - 1991.
59. Тепло и массообмен. Теплотехнический эксперимент // Справочник под общ. ред, В.А. Григорьева, В.М.Зорина, М.: Энергоиздат, - 1982. – 190 с.
60. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел // М.: Наука, - 1964. - - 254 с.
61. Сафонов Е.Н. Структура и твердость чугуна после поверхностной закалки // Металловедение и термическая обработка металлов. 2005. - №9. - С. 38-43.
62. Лямбер Н. Металлография сплавов железа // Справочник под ред. Н. Лямблера. М.: Металлургия, - 1985. - 248 с.
63. Домбровский Ю.М., Бровер А.В. Обработка стали воздушно-плазменной дугой со сканированием // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1999. - №1. – с. 10 - 13.
64. Коротков В.А., Трошин О.В., Бердников А.А. Плазменная закалка сканируемой дугой без оплавления поверхности // Физика и химия обработки материалов. – 1995. - №2. – с. 101 – 106.
65. Хасуи А., Моригаки О. Наплавка и напыление // М.: Машиностроение. 1985.-240 с.
66. Вайнерман А.Е., Шоршоров М.Х., Веселков В.Д., Новосадов В.С. Плазменная наплавка металлов // Л.: Машиностроение. 1969. -192 с.
67. Земзин В.Н. Сварные соединения разнородных металлов // М. - Л.: Машиностроение, 1969. – 156 с.
68. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке // М.: Машгиз. – 1961.
69. Пузряков А.Ф., Теоретические основы технологии плазменного напыления // М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003.-360с.
70. Шехтер С.Я., Резницкий А.М. Наплавка металлов // М.: Машиностроение, 1982.- 192 с.

71. Сидоров А.И. Восстановление деталей машин напылением и наплавкой // М. : Машиностроение, 1987. - 192 с.
72. Бойцов А.Г. и др. Упрочнение поверхностей деталей комбинированными способами // М.: Машиностроение. 1991. - 230 с.
73. Рыкалин Н.Н., Николоев А.В., Кулагин И.Д. Тепловой поток в тело взаимодействующее с плазменной струей // Теплофизика высоких температур. 1965, - №6. С. 25-27.
74. Николаев А.В. Тепловые и силовые характеристики плазменной струи аргона // дис. канд. техн. наук: - М.: 1961. – 162 с.
75. Термодинамические и оптические свойства плазмы металлов и диэлектриков. // Справочник. – М.: Металлургия, 1988. – 400 с.
76. Гинзбург Е.Г., Кобяков О.С., Гелпер М.А., и др. Исследование процессов микроплазменной закалки сталей // Металловедение и термическая обработка материалов. 1988. - №5. с. 10-13.
77. Крапошин В.С., Бобров А.В., Гапоненко О.С. Поверхностная закалка стали 9ХФ при нагреве теплом плазменной горелки // Металловедение и термическая обработка материалов, 1989. - №11. с. 13-17.
78. Палицук И.Е., Ясинская О.Г. Особенности структуры поверхностного слоя стали 40Х, упрочненной потоком высоких энергий // Электронная обработка материалов, 1986. - №4. с. 21-23.
79. Деев В.А., Александров В.Н., Ермаков А.В. Микроплазменное упрочнение деталей // Научный прогресс в авторемонтном производстве. Материалы семинара. М.: МДНТП. -1990. - С. 95 - 97.
80. Щицын Ю.Д. Исследование характеристик плазменных процессов // Методическое руководство к лабораторной работе. ПГТУ. Пермь, 1997. – 14 с.
81. С.И. Полосков, В.А. Букаров, И.А. Бурлаков, Т.А. Дорина Оптимизация технологических параметров процесса сварки стабилизированной дугой обратной полярности // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Сварка в ядерной технологии. - 1988. - Вып.1(20). - С.19-25.

82. Хурцидзе Г.С., Дудко Д.А., Кирниенко А.Н. Тепловая эффективность дуги, сжатой радиальным потоком газа // Автоматическая сварка. - 1978. - №8. - С.67-68.
83. Демянцевич В.П., Михайлов Н.П. Составляющие теплового баланса микроплазменной дуги // Автоматическая сварка. - 1973. - №1. - С.25-27.
84. В.А. Малаховский, В.А. Стихин, В.Г. Крутиковский, Ю.А. Попков Разработка плазмотрона и технологии плазменной сварки высокопрочной стали // Сварочное производство. - 1985. - №1. - С.13 - 15.
85. Жуков М.Ф., Аньшаков А.С., Дандарон Г.-Н.Б. Эрозия электродов / сб. «Приэлектродные процессы и эрозия электродов плазмотронов». - Новосибирск. АН СССР Инс. теплофизики. 1977. - 123 с.
86. Лесков Г.И. Электротехническая сварочная дуга. - М.: Машиностроение, 1970. - 335с.
87. Самервилл Дж. М. Электрическая дуга. - М.–Л.: Госиздат., 1962. - 120 с.
88. Финкельбург В., Меккер Г. Электрические дуги и термическая сварка. - М.: Иностран. лит., 1961. - 370 с.
89. Петров А.В. Плазменная сварка // Итоги науки и техники. Сер. Сварка. – ВИНТИ, 1980. - Т.12. - С. 53-67.
90. Щицын Ю. Д., Косолапов О. А., Струков Н. Н. Распределение энергии сжатой дуги при работе плазмотрона на токе обратной полярности // Сварка и диагностика №3 – 2010. с. 13 – 16.
91. Щицын В.Ю., Язовских В.М., Щицын Ю.Д. О тепловых нагрузках на сопло плазмотрона при работе на прямой и обратной полярности // Сб. тезисов Юбилейной 20-ой НТК сварщиков Урала «Сварка Урала – 2001» - Н. Тагил. - 2001. - С. 21.
92. Щицын В.Ю., Язовских В.М. Влияние полярности на тепловложение в сопло плазмотрона // Сварочное производство. - 2002. - №1. - С. 17 – 19.

93. Борисенко Н.И., Тусишвили О.С., Гасишвили Г.П. Течение газов в катодной камере аксиального плазмотрона с торцовым катодом // Сварочное производство. - 1980. - № 12. - С. 26-28.
94. Исакиев Э.Х., Тюфяков А.С. Влияние геометрии сопла на характеристики дуги в плазмотроне для резки металлов. // Сварочное производство. - 1994. - №7. - С.23-24.
95. Сидоров В.П. Расчет теплоотвода в сопло плазмотрона от столба плазменной аргоновой дуги // Сварочное производство. - 1987. - №2. - С.36-37.
96. Губенко В.А., Молоканова Т.В., Новиков А.М. Влияние тока сжатой дуги и расхода газа на нагрев сопла // Автоматическая сварка. - 1975. - №5. - С.45 - 47.
97. Patte H.E. Anno J.N., Randall M.D. Theoretical and experimental study of cathodic cleaning with the plasma arc // Welding Journal. – 1968. - № 4. vol. 47. - p. 181-192.
98. Щицын Ю.Д., Тюткин Ю.М. Исследование способа катодной очистки для подготовки деталей под пайку // Сб. Сварка в машиностроении. М.: ЦРДЗ. - 1995. - С. 96-99.
99. Беленький В.Я., Трушников Д.Н., и др. Математическое описание и анализ сварочных высококонцентрированных тепловых источников // Вестник Ижев. гос. техн. ун-та. – 2012. – №3. – с. 46–50.
100. Мусин Р.А., Трушников Д.Н., Шкурихин В.А., Путин Ю.А. Математическое моделирование сварочных процессов в пакете Femlab 3.0 // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. 2010. Т.12. №4 с. 7 – 16.
101. Самошин И.Г. Справочник молодого термиста // М.: Высш. школа. 1966. 344 с.
102. Белинин Д.С., Щицын Ю.Д., Верхорубов В.С., Кучев П.С., Струков Н.Н. Получение упрочненных слоев высоколегированных сталей с заданными характеристиками методом плазменной закалки с

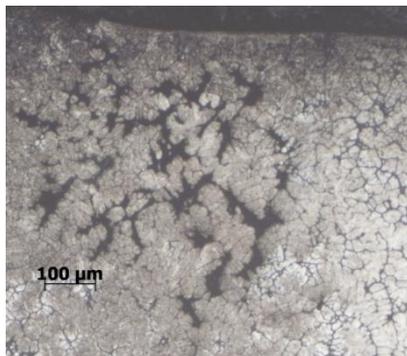
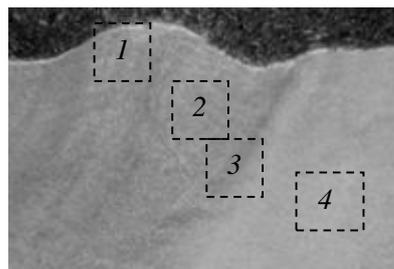
- оплавлением поверхности // Инновационные технологии в машиностроении. Пермь: ПНИПУ, 2012. с. 101 – 106.
103. Белинин Д.С., Неулыбин С.Д., Кучев П.С., Щицын Ю.Д. Закалка тяжело нагруженных изделий на токе прямой полярности // Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке.[электронный ресурс]. Ижевск. ИжГТУ, 2013. с 147 – 151.
104. Белинин Д.С., Неулыбин С.Д., Кучев П.С., Шилов А.Ю. Комбинированные варианты плазменной закалки на токе прямой полярности // Master's Journal. 2012, №2. с. 23 – 29.
105. Ablyaz T.R., Belinin D.S. Wire Electrical Discharge Machining of Items After Plasmatic Surface Hardening // Middle – East Journal of Scientific Research [Electronic Resource]. 2014. p. 1094 – 1098.
106. Белинин Д.С., Щицын Ю.Д. Плазменная поверхностная термообработка высоколегированных сталей током обратной полярности // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 2 URL:<http://www.science-education.ru/116-12650>
107. Белинин Д.С., Щицын Ю.Д., Кучев П.С., Струков Н.Н. Технологические варианты плазменной закалки на токе обратной полярности // Фундаментальные проблемы техники и технологии. 2012, № 3-2. с. 99 – 104.
108. Белинин Д.С., Щицын Ю.Д., Кучев П.С., Неулыбин С.Д. Упрочнение рабочих поверхностей изделий методом плазменной поверхностной закалки на токе обратной полярности // Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке.[электронный ресурс]. Ижевск. ИжГТУ, 2013. с 20 – 25.
109. Щицын Ю.Д., Неулыбин С.Д., Белинин Д.С., Кучева П.С. Восстановительная наплавка малогабаритных изделий // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 2; URL:<http://www.science-education.ru/116-12629>
110. Щицын Ю.Д., Белинин Д.С. Плазменная наплавка сжатой дугой обратной полярности // Сварка и диагностика. 2013, №6. с. 47 – 48.

111. Щицын Ю.Д., Белинин Д.С., Неулыбин С.Д., Кучев П.С. Повышение ресурса работы ротора пластинчатого насоса // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. 2013, №3. с 67 – 73.
112. Кучев П.С., Щицын Ю.Д., Белинин Д.С., Шилов А.Ю. Тепловые характеристики при однодуговом и комбинированном режиме работы плазмотрона // Сварка. Реновация. Триботехника. Нижний Тагил: НТИ (филиал) УРФУ, 2013. с. 46 – 49.
113. Неулыбин С.Д., Белинин Д.С., Кучев П.С., Гилев И.А. Исследование плазменной наплавки меди при работе плазмотрона на токах прямой и обратной полярности // Master's Journal. 2013, №2. с. 22 – 27.
114. Неулыбин С.Д., Белинин Д.С., Щицын Ю.Д., Кучев П.С. Использование тока обратной полярности для плазменной наплавки // Молодежь и наука[электронный ресурс]. Нижний Тагил: НТИ (филиал) УРФУ, 2013. с. 78 – 82.
115. Кучев П.С., Белинин Д.С., Шилов А.Ю., Щицын Ю.Д. Исследование различных схем подключения двухкамерного плазмотрона // Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке.[электронный ресурс]. Ижевск. ИжГТУ, 2013. с 124 – 128.
116. Лещинский Л.К., Самотугин С.С., Пирч И.И. Трещиностойкость многослойного наплавленного металла упрочненного высококонцентрированным источником нагрева // Сварочное производство. 1987. №4 – с. 25 – 27.
117. Синайский В.М., Пищик Е.Л., Григоренко А.П. Остаточные напряжения в сталях после плазменной закалки // Физика и технология обработки поверхности металлов. Ленинград. ФТИ. 1974.
118. Польцер Г., Майслер Ф. Основы трения и изнашивания // М.: Наука. 1977. 136 с.
119. Костецкий В.И. Трение, смазка и износ в машинах // Киев: Техника. 1970. 396 с.

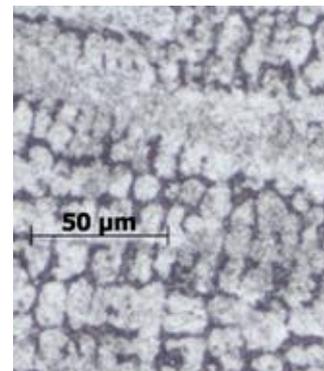
120. Крагельский И.В. Трение и износ // М.: Наука. 1970. 252 с.
121. Хрущев М.М., Бабичев М.А. Абразивное изнашивание // М.: Наука. 1970. 252 с.
122. Гаркунов Д.Н. Триботехника // М.: Машиностроение. 1989. 328 с.
123. Тенебаум М.М. Сопротивление абразивному изнашиванию // М.: Машиностроение. 1976. 270 с.

Образец №1

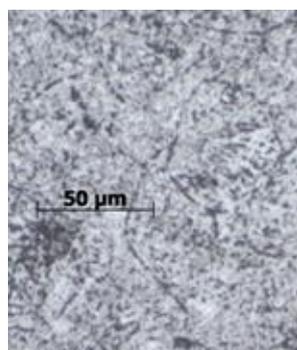
Проходы выполнены с последующем переплавом упрочнённых слоёв на более жестком режиме(рис. 1.). В результате дорожки выполнены с различной глубиной проплавления: 4,0мм до переплава и 8,0мм после, ширина упрочнённой за один проход дорожки 11мм, усиление 1,0мм. В дорожке с наибольшей глубиной проплавления наблюдается занижение 0,3мм, в центральной зоне дорожки у поверхности наблюдается наличие мелких усадочных рыхлот (рис. 1. уч.1). Растрескиваний, пор в упрочненных дорожках нет.



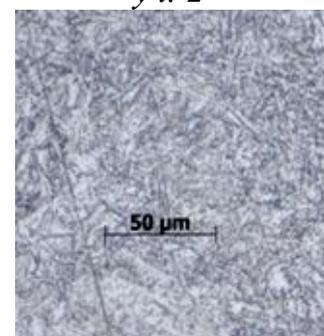
*уч. 1*



*уч. 2*



*уч. 3*



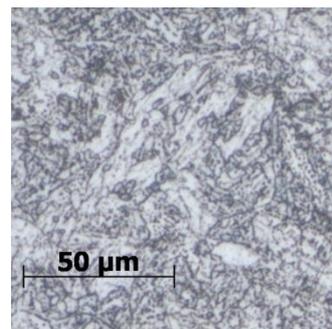
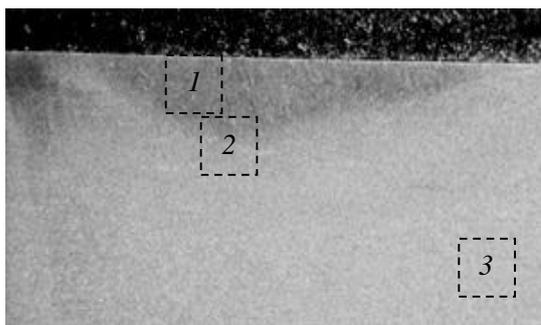
*уч. 4*

*Рис. 1. Вид макро(x8)- и микроструктуры(x400) исследуемого образца №1.*

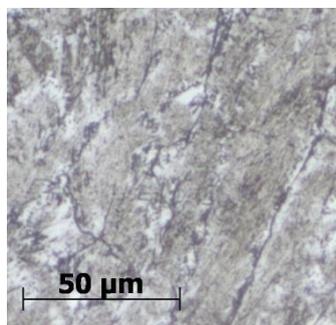
Структура основного материала образца представляет собой феррито-карбидную смесь (рис.1 уч.4). Структура характерна для данного материала в состоянии после отжига либо высокого отпуска. Структура зоны оплавления (рис. 1 уч.2) упрочнённого слоя представляет собой структуру мартенситного типа с выделениями карбидной сетки в осях дендритов. В ЗТВ (рис. 1 уч.3) структура от мартенсита (у границы сплавления и в зоне высокотемпературного нагрева под сварочной ванной) с переходом к структуре мартенситного типа с выделениями карбидов и феррито-карбидной смеси в зоне перехода к основному.

### Образец №2

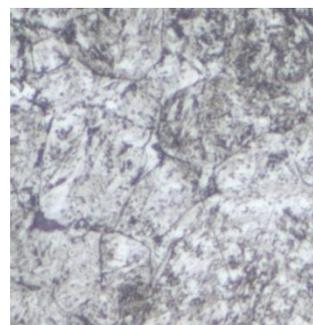
Поверхность механически обработана. Вид макрошлифа образца приведен на (рис.2). Глубина упрочненной зоны 1,0...1,1мм, ширина упрочнённой зоны 7,5...9,0мм. Трещин, пор, рыхлот и других дефектов в зоне оплавления и ЗТВ закалённого слоя нет. Структура основного материала представляет собой феррито-карбидную смесь (аналогично образцу № 1 с тем отличием, что на образце № 2 имеются ферритные зёрна без выделений карбидов). Структура закристаллизовавшейся зоны оплавления представляет собой структуру мартенситного типа с тонкими прослойками карбидной сетки в осях дендритов. На границе сплавления структура аналогична структуре зоны оплавления (с тем отличием, что в оплавленной зоне форма кристаллитов вытянутая, а на границе сплавления зерна равноосной формы). В ЗТВ структура представляет собой феррито-карбидную смесь различной дисперсности, количество карбидной фазы увеличивается по мере приближения к основному материалу.



уч. 1



уч. 2

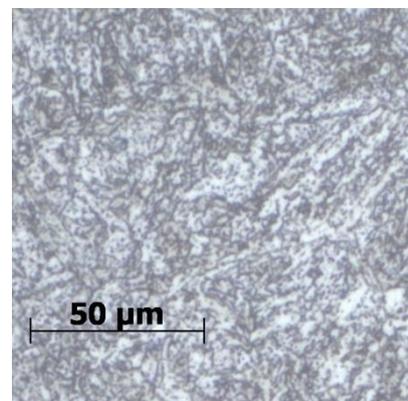
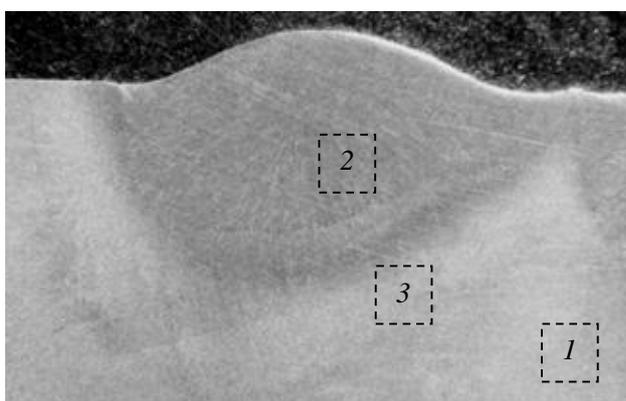


уч. 3

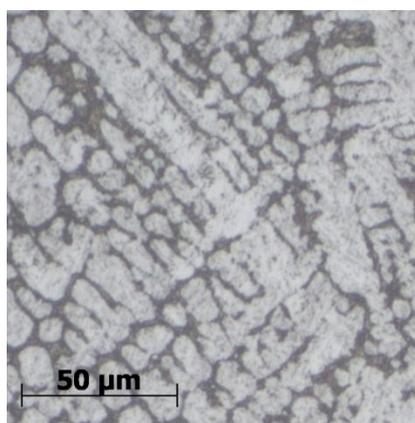
Рис. 2. Вид макро( $\times 8$ )- и микроструктуры( $\times 400$ ) исследуемого образца №2.

Образец №3

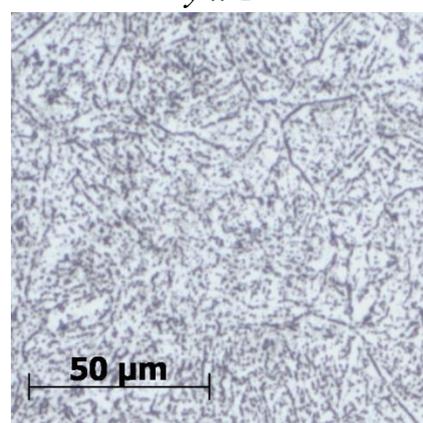
Вид макрошлифа образца приведен на (рис.3). Величина усиления 0,9...1,0мм, ширина упрочнённой дорожки 9,5...10,5мм, глубина 4,35мм. Структура основного материала аналогична образцам № 1, 2 с отличием, что структура сохранила некоторую ориентацию (рис.3 уч.1).



уч. 1



уч. 2



уч. 3

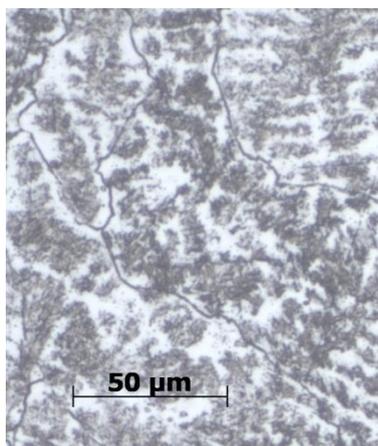
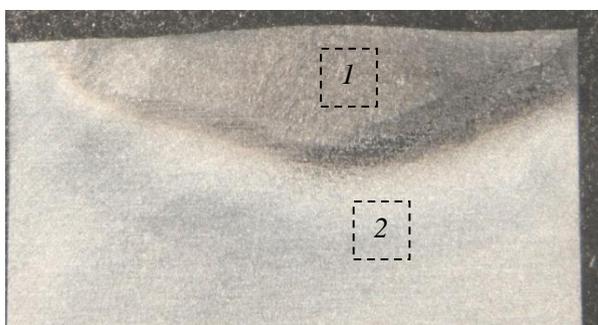
Рис. 3. Вид макро( $\times 8$ )- и микроструктуры( $\times 400$ ) исследуемого образца №3.

Структура закристаллизовавшейся зоны оплавления (рис.3 уч.2) представляет собой мартенсит с выделениями карбидной фазы по осям дендритов. В зоне термовлияния наблюдается спектр структур – от структуры бейнитного типа на границе сплавления с переходом к структуре

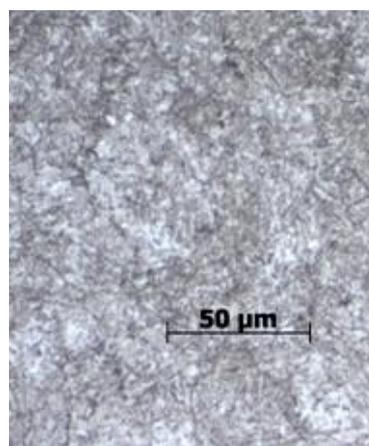
мартенситного типа с выделениями карбидов (как в теле зерна, так и по границам зёрен) до феррито-карбидной смеси различной дисперсности (рис.3 уч.3).

#### Образец №4

Вид макрошлифа образца приведен на (рис.4). Величина усиления 0,3мм, ширина закалённой дорожки 12мм, глубина 1,9мм. Структура закристаллизовавшейся зоны оплавления представляет собой структуру бейнитного типа с участками свободного феррита в межосных пространствах дендритов (рис.4 уч.1). На границе сплавления с основным материалом и прилежащих участках ЗТВ структура представляет собой структуру бейнитного типа. По мере отдаления от границы сплавления структура сначала мартенситного типа, далее – мартенсит + карбиды, далее – феррито-карбидная смесь (рис.4 уч.2).



уч.1



уч.2

Рис. 4 Вид макро( $\times 8$ )- и микроструктуры( $\times 400$ ) исследуемого образца №4.

#### Образец №5

Вид макрошлифа образца приведен на (рис.5). Усиления нет, ширина упрочнённой дорожки 9,7... 10,5мм, глубина 1,2мм, ширина ЗТВ 1,7мм.

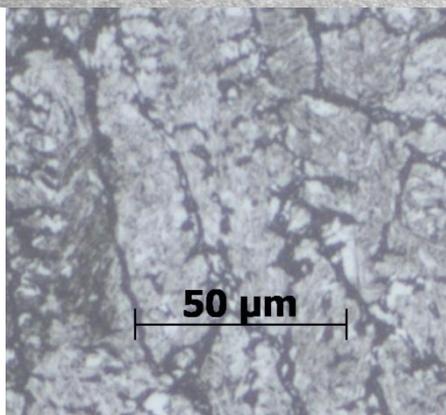
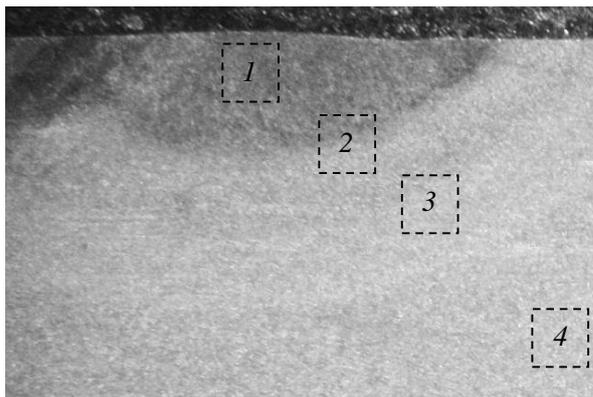


Рис. 5. Вид исследуемого образца №5.

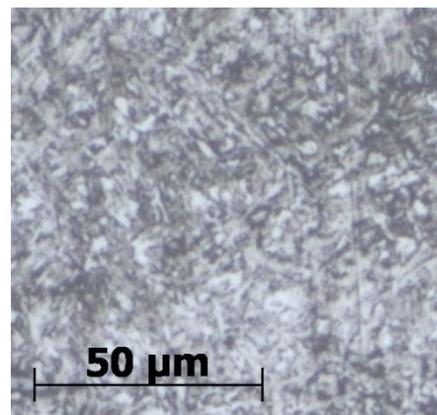
Структура основного материала аналогична образцам № 1, 2. Структура закристаллизовавшейся сварочной ванны представляет собой структуру бейнитного типа с участками свободного феррита в межосных пространствах дендритов (аналогична структуре образца № 4 с тем отличием, что прослойки свободного феррита несколько тоньше). На границе сплавления – структуры бейнитного типа и структуры мартенсита отпуска (мартенсит с выделениями карбидов в теле и по границам зёрна). В зоне термовлияния наблюдается спектр структур мартенсита отпуска с плавным переходом к структуре основы.

#### Образец №6

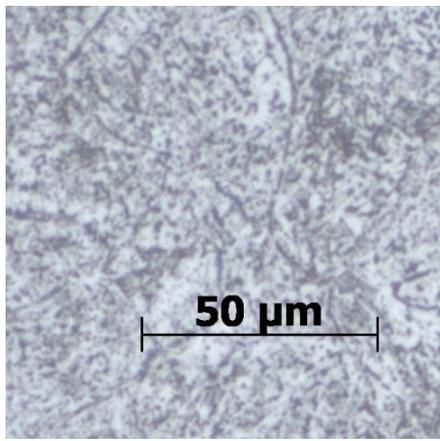
Вид макрошлифа образца приведен на (рис.6). Усиления нет, ширина упрочнённой дорожки 5,0 мм, глубина проплавления 1,4 мм.



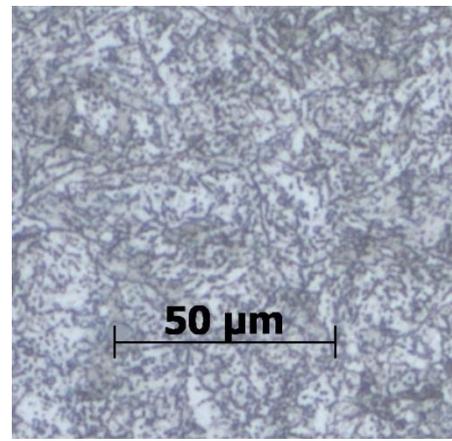
уч. 1



уч. 2



уч.3



уч.4

*Рис. 6. Вид макро(х8)- и микроструктуры(х400) исследуемого образца №6.*

Структура основного материала аналогична образцам № 1, 2 (рис.6 уч.4). Структура ЗТВ, ближе к поверхности образца, представляет собой структуру бейнитного типа с включениями свободного феррита и выделениями карбидной фазы по границам кристаллитов (рис.6 уч.1). На границе ЗТВ и переходной зоны структура бейнитного типа с мелкими включениями свободного феррита (рис.6 уч.2). В переходной зоне – структуры мартенсита отпуска с плавным переходом к структуре основы (рис.6 уч.3).

#### Образец №7

Вся поверхность образца механически обработана.

Вид макрошлифа образца приведен на (рис.7). Усиления нет, ширина упрочнённой дорожки 10,3...11,6мм, глубина зоны оплавления 1,5...2,1мм, зоны закалки из твердой фазы 2,1...2,8мм. Структура основного материала (рис.7 уч.4) аналогична образцам № 1, 2 с отличием в том, что на образце № 11 наблюдается разнотерность и неравномерность количества карбидных выделений (выделяются границы первичного зерна). Структура зоны оплавления представляет собой структуру мартенситного типа с ферритной сеткой по границам кристаллитов (рис.7 уч.1). У границы сплавления в основном материале наблюдаются участки с крупными участками свободного феррита и сопутствующей бейнитной структурой, в остальной зоне по границе сплавления - структура мартенситного типа (рис.7 уч.2). В

зоне термовлияния – структура мартенсита отпуска с плавным переходом к структуре основы (рис.7 уч.3).

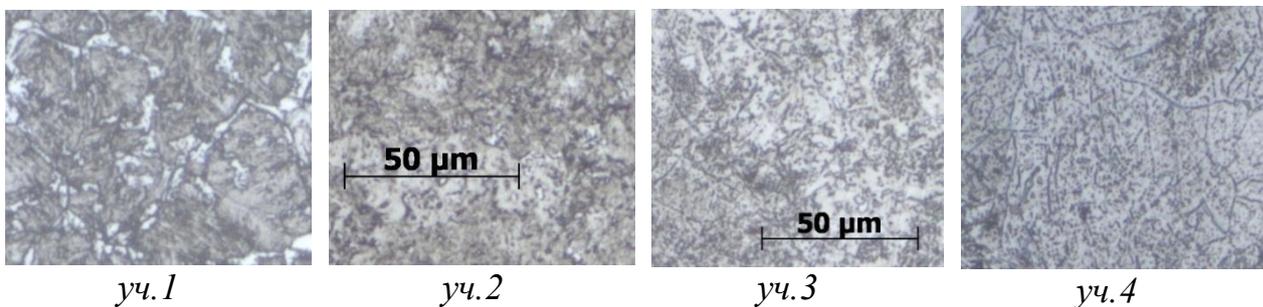
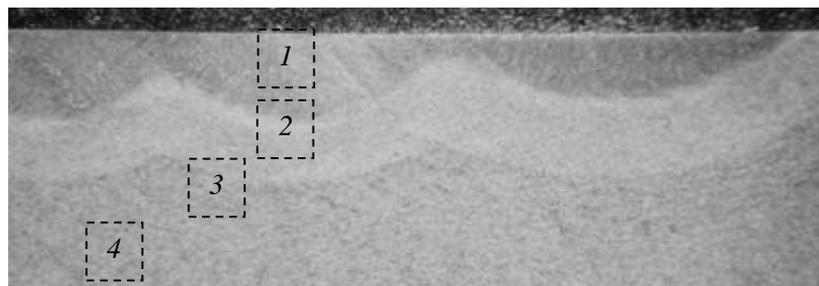


Рис. 7. Вид макро(х8)- и микроструктуры(х400) исследуемого образца №7.

#### Образец №8

Вид макрошлифа образца приведен на (рис.8). Усиления нет, ширина шва 6,5...6,7мм, глубина упрочненной зоны 2,1...3,3мм. Структура основного материала аналогична образцам № 1, 2. Структуры бейнитного типа наблюдаются в приповерхностной зоне закалённого слоя, очевидно в результате повторного прохода (рис.8 уч.1).

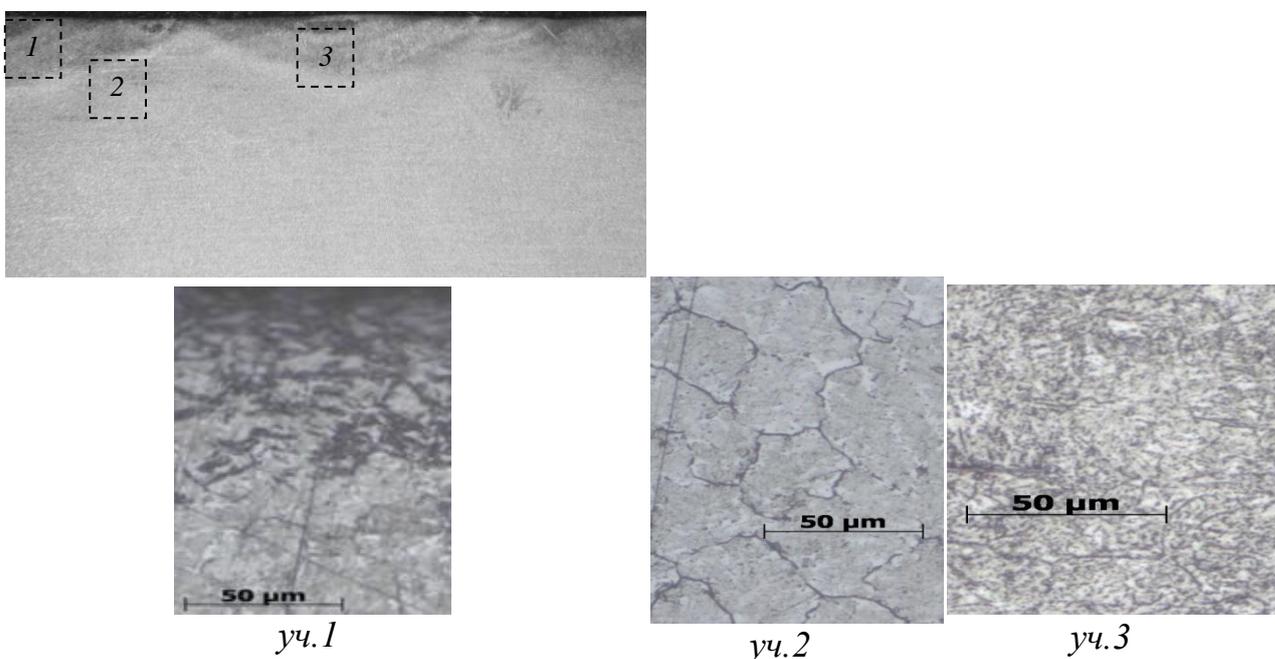


Рис. 8. Вид макро(х8)- и микроструктуры(х400) исследуемого образца №8.

Структура остальной части упрочнённой дорожки мартенситного типа с выделениями карбидов по границам первичного зерна и участками выделений феррита (рис.8 уч.2). В зоне термовлияния – структура мартенсита отпуска с плавным переходом к структуре основы (рис.4.8 уч.3).



Общество с ограниченной ответственностью  
Россия, 614051, г. Пермь, ул. Пушкарская, 51  
Тел/факс (342) 261-22-00; E-mail: [OOOAlfateh@vandex.ru](mailto:OOOAlfateh@vandex.ru)

### АКТ

№ 1/12 от 10.10.2012 г.

*об использовании результатов научно-исследовательской работы по договору № 2010/474 от 10.12.2010 г. «Исследование возможности плазменной наплавки и термообработки для изготовления опорной пары (каток-плита) мостовых конструкций» и работ по договору № 2011/85 «Плазменная поверхностная термообработка опорной пары мостовой конструкции». Ответственный исполнитель договора - Д.С. Белинин.*

Результаты исследований, полученные в рамках выполнения научно-исследовательских работ по договору № 2010/474, были использованы в условиях производства ООО "АльфаТех" при разработке (чертежи 1228 КМД-102.12.00.01 и 1228 КМД-102.12.00.02) и изготовлении по договору № 2011/85 тяжело нагруженных изделий ОКОЧ-Л-1200±140 на вертикальную нагрузку 1200 тонн.

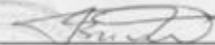
С применением разработанной технологии изготовлены опорные пары «каток-плита (вставка опорная)» однокатковых опорных частей (ОКОЧ) мостовых конструкций из высоколегированной стали 40X13.

Разработанная технология плазменной поверхностной термообработки обеспечивает требования, установленные Заказчиком, к характеристикам поверхностного слоя деталей.

Твердость упрочненного слоя составляет 52-56 HRC, глубина упрочненного слоя составляет не менее 4 мм, что не имеет близких аналогов в практике поверхностной закалки.

Разработанной технологией обеспечено высокое качество изделий, подтвержденное заключениями ОАО НПО «Искра» №616/119 от 13.04.2011 г. и №616/120 от 13.04.2011 г. по результатам ультразвукового контроля вставок опорных и катков изделия ОКОЧ-Л-1200±140. Поводки и изменения геометрических размеров деталей отсутствуют.

Изделия, изготовленные с использованием разработанной технологии переданы Заказчику и работают (внедрены) в составе мостовой конструкции через реку Менда на 757 км (ПК 7567+47) ж.д. линии Беркакит – Томмот – Якутск.

Генеральный директор  В.В. Буканов

Исп. Ипанов А.С. (342) 261-22-99

