

На правах рукописи  
УДК 621.791

Амеличева Анна Юрьевна

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ НАРУЖНЫХ  
ПОВЕРХНОСТЕЙ В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЯХ  
ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ НАВАРКОЙ СВАРОЧНОЙ ПРОВОЛОКИ  
Св-08Г2С**

Специальность 05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2019

Работа выполнена на кафедре сварки и диагностики  
Калужского филиала МГТУ имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель: доктор технических наук  
**ДУБРОВСКИЙ Владимир Анатольевич**  
КФ МГТУ имени Н.Э. Баумана, профессор

Официальные оппоненты: доктор технических наук, доцент  
**ПАРШИН Сергей Георгиевич**  
СПбПУ Петра Великого, заведующий кафедрой теории и технологии сварки материалов  
кандидат технических наук, доцент  
**ТЕРЕНТЬЕВ Егор Валериевич**  
НИУ «МЭИ», кафедра технологий металлов, доцент

Ведущая организация: **РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М.Губкина, г. Москва**

Защита состоится «06» июня 2019 г. в 14:30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.01 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.

Телефон для справок: +7 (499) 267-09-63.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью организации, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ имени Н.Э. Баумана и на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» 2019 г.

УЧЁНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
диссертационного совета  
к.т.н.



Прилутский М.А.

## 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** В настоящее время одной из наиболее важных проблем, стоящих перед машиностроительными предприятиями в РФ и зарубежных странах, является продление срока эксплуатации работающих машин и механизмов, что, прежде всего, связано с выполнением работ по восстановлению (ремонту) различных деталей (изделий).

Как показывают различные исследования до 80% изношенных цилиндрических деталей машин и механизмов целесообразно восстанавливать, применяя современные технологии (способы) ремонта.

По данным ООО "НПП "Велд", среди изношенных цилиндрических деталей до 15-20% изделий должны иметь достаточно низкую твердость наружных поверхностей около 28-33 HRC (270-310 НВ), а для 10-15% изделий она, по условиям эксплуатации, может быть любой, поэтому их также целесообразно отнести к изделиям с невысокой твердостью. Таким образом, общий объем ремонтируемых деталей, рассматриваемых в данной работе, составляет около 25-35% и распространяется на изделия типа «втулка» или «вал» с наружными цилиндрическими и коническими поверхностями с углом конуса не больше 8°. Такое объединение деталей возможно, так как технологии нанесения покрытий на наружные поверхности таких изделий, как правило, одинаковы.

Рассматриваемая номенклатура изделий распространяется на наружные поверхности цилиндрических и конических деталей, которые в процессе эксплуатации неподвижны по отношению к ответным сопрягаемым изделиям, а также работают на трение качения или скольжения и по условиям работы не требуют применения операции обязательного поверхностно-пластического деформирования (ППД) нанесенного покрытия с целью повышения усталостной прочности.

Для ремонта наружных поверхностей в рассматриваемых изделиях наиболее часто используются различные технологии дуговой наплавки, газотермического напыления и электроконтактной наварки (ЭКН) различными материалами, в том числе, способ электроконтактной наварки проволоки (ЭКНП).

Технологию ЭКНП выполняют с применением мягких или жестких режимов, с подплавлением и без подплавления соединяемых металлов, что приводит к изменению прочности сцепления  $\sigma_{сц}$  между ними и высоты (толщины) подъема валика (слоя) наваренного металла  $h$ . ЭКНП без подплавления соединяемых металлов позволяет получить меньшую прочность сцепления  $\sigma_{сц}$  между присадочными и основными металлами, но больший подъем толщины слоя наваренного металла  $h$  и незначительные остаточные перемещения размеров, а наварка с подплавлением соединяемых металлов в месте их контакта дает прямо противоположные результаты.

Однако до настоящего времени нет полной ясности, какая прочность сцепления  $\sigma_{сц}$  между соединяемыми металлами после ЭКНП достаточна для надежной работы деталей в процессе последующей эксплуатации.

Данное обстоятельство не позволяет, в свою очередь, перейти на режимы ЭКНП, повышающие производительность процесса за счет большего подъема толщины слоя наваренного металла  $h$  за один проход. Технология ЭКНП наиболее конкурентоспособна, по сравнению с другими известными способами нанесения покрытий, при устранении износа наружных поверхностей изделий наваркой одного слоя металла С. Значительно меньший эффект от применения технологии ЭКНП наблюдается при наварке второго и особенно последующих слоев С.

По этой причине наиболее целесообразно стремиться выполнять ЭКНП за один проход, обеспечивая максимальный подъем толщины слоя наваренного металла  $h$ , на режимах с применением минимально допустимых токов наварки  $I_h$  при постоянных прочих параметрах технологии. Однако применять ток наварки  $I_h$  как основной параметр режима нецелесообразно из-за сильной зависимости его от размеров восстановляемых деталей и необходимости иметь специальные приборы для измерения. Значительно проще режим наварки представлять относительными величинами – осадкой проволоки  $\varepsilon$  или ее осевой деформацией  $\eta$ .

Из приведенных формул (1 и 2) хорошо видно, что, в отличие от осевой деформации  $\eta$ , осадка проволоки  $\varepsilon$  не зависит от диаметра ремонтируемой детали  $D$ , а изменяется только при варьировании диаметра проволоки  $d_{np}$  и толщины слоя наваренного металла  $h$ . Независимость осадки  $\varepsilon$  от размеров деталей  $D$  и простота ее измерения в процессе ЭКНП определили ее выбор в качестве основного параметра технологии.

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{h}{d_{np}}\right) \cdot 100\% \text{ или } h = d_{np} (1 - 0,01 \cdot \varepsilon); \quad (1)$$

$$\eta = \left(1 - \frac{l_\phi}{l_p}\right) \cdot 100\% = \left(1 - \frac{l_\phi}{\pi(D + d_\phi)}\right) \cdot 100\%, \quad (2)$$

где  $h$  – высота валика наваренного металла, мм,  $l_\phi$  и  $l_p$  – соответственно фактическая и расчетная длины присадочной проволоки, мм.

Режимы наварки, обеспечивающие надежное соединение присадочной проволоки с основным металлом, определены для высокоуглеродистых проволок типа Нп-65Г, использование которых позволяет получить твердость наваренного металла не меньше 50 HRC. Для рассматриваемой номенклатуры деталей ЭКН проволокой Нп-65Г приведет к необоснованно высокой, а порой и недопустимой, твердости наружных поверхностей.

Между тем, для применения низкоуглеродистых проволок, которые в процессе наварки позволяют получить твердость наиболее близкую к рассматриваемой в этой работе, нет достаточных оснований, по причине отсутствия исследований технологических свойств таких покрытий после ЭКНП наружных поверхностей изделий из стали 45 и ее аналогов.

По результатам предварительных исследований из нескольких проволок была выбрана сварочная Св-08Г2С, которая позволяет в процессе ЭКНП в один-три слоя получать твердость наружных поверхностей образцов равную

270-310 НВ, что приблизительно в полтора-два раза выше, чем при механизированной дуговой наплавке в защитных газах таким же материалом.

Исследование технологии ЭКН сварочной проволоки Св-08Г2С диаметром 2 мм на жестких и мягких режимах, а также изучение их влияния на технологические свойства покрытия не проводились, а если наварка и выполнялась, то на режимах ЭКН (осадки  $\varepsilon \geq 70\%$ ), определенных для высокоуглеродистых проволок.

Поэтому необходимо исследовать и установить максимально возможные допустимые интервалы изменения режимов наварки (осадки проволоки  $\varepsilon$ ) при которых достигается наибольшая производительность процесса ЭКН сварочной проволоки Св-08Г2С диаметром 2 мм и твердость наружных поверхностей деталей 270-310 НВ при наварке одного-трех слоев С, а также обеспечивается достаточная прочность сцепления  $\sigma_{\text{сц}}$  и сплошность покрытий при отсутствии в них дефектов в виде проскоков, шелушения, пор и трещин.

Наибольшая производительность процесса наварки определяется максимальным подъемом слоя наваренного металла  $h$ , который изменяется при варьировании осадки проволоки  $\varepsilon$ , а также ее диаметра  $d_{\text{пр}}$  (1). Для максимально возможного при ЭКН диаметра проволоки 2 мм повысить производительность можно только за счет применения осадки  $\varepsilon < 70\%$  (1).

Однако при ЭКНП с осадками  $\varepsilon < 70\%$  могут появиться вопросы о достаточности прочности сцепления  $\sigma_{\text{сц}}$  между основным и наваренным металлами.

В процессе эксплуатации разные детали испытывают различные нагрузки, поэтому нет необходимости для всех изделий обеспечивать одинаковые прочности сцепления  $\sigma_{\text{сц}}$  между соединяемыми металлами, что предполагает распределение восстановляемых деталей на группы с назначением для каждой своих режимов наварки (осадки проволоки  $\varepsilon$ ).

Для обеспечения достаточной прочности сцепления  $\sigma_{\text{сц}}$  между соединяемыми металлами в технической литературе рекомендуется выполнять ЭКН проволоки Нп-65Г без оплавления соединяемых металлов с осадкой  $\varepsilon = 65\text{-}68\%$ , а при наварке с подплавлением не меньше 70%.

Обоснованный переход на режимы наварки с осадкой проволоки  $\varepsilon < 65\%$  является основным резервом повышения производительности технологии ЭКН любыми проволоками и, в частности, Св-08Г2С.

По методике ООО «НПП «Велд» в цилиндрических образцах типа «втулка» из стали 45 на допустимых режимах наварки также необходимо определить количественные значения остаточных радиальных перемещений размеров после ЭКН сварочной проволоки Св-08Г2С диаметром 2 мм в один-три слоя и электроконтактной поверхностной осадки (ЭКПО) в один-три прохода.

Все вышесказанное показывает актуальность проведения дальнейших исследований, направленных на изучение технологических свойств покрытия, полученного ЭКН проволоки Св-08Г2С диаметром 2 мм.

**Целью диссертационной работы** является повышение производительности процесса наварки, а также обеспечение достаточной прочности сцепления  $\sigma_{\text{сц}}$  между соединяемыми металлами и твердости покрытия 270-310 НВ наружных поверхностей цилиндрических деталей после ЭКН сварочной проволоки Св-08Г2С диаметром 2 мм.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Исследовать и обосновать выбор осадки проволоки  $\varepsilon$  в качестве основного параметра предлагаемой технологии ЭКНП.
2. Исследовать и установить технологические и допустимые интервалы изменения осадки  $\varepsilon$  сварочной проволоки Св-08Г2С диаметром 1,6-2,0 мм при ЭКН различных групп деталей.
3. Исследовать и установить количественные значения прочности сцепления  $\sigma_{\text{сц}}$  между основным и наваренным металлами, а также механизм повышения и незначительного снижения твердости наружных поверхностей образцов из стали 45 при отсутствии дефектов в покрытии после многослойной ЭКН сварочной проволоки Св-08Г2С диаметром 2 мм при варьировании осадки  $\varepsilon$  в допустимых интервалах.
4. Исследовать и установить по микрошлифам образцов из стали 45 закономерность изменения структуры наваренного и основного металлов после ЭКН сварочной проволоки Св-08Г2С диаметром 2 мм при варьировании осадки проволоки  $\varepsilon$  в допустимых интервалах.
5. Исследовать и установить количественные значения остаточных радиальных перемещений размеров в образцах типа «втулка» из стали 45 после ЭКН сварочной проволоки Св-08Г2С диаметром 2 мм в один-три слоя и ЭКПО в один-три прохода  $i$  при варьировании режимов (осадки  $\varepsilon$ ) в допустимых интервалах.
6. Разработать и внедрить в опытное производство ООО «НПП «Велд», а также учебный процесс кафедры М2-КФ «Сварка и диагностика» КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана технологии элекротоконтактной наварки сварочной проволоки Св-08Г2С диаметром 2 мм различных наружных поверхностей в цилиндрических деталях с твердостью 270-310 НВ.

### **Методы исследования.**

Для достижения поставленной цели использовались экспериментальные и расчетные методы исследования. ЭКНП образцов производилась на установке УЭН-01. Исследование прочности сцепления  $\sigma_{\text{сц}}$  выполнялось на разрывной машине МИ-40У в разборном образце. Измерение твердости полученных покрытий производилось по ГОСТ 2999-75. Определение остаточных радиальных перемещений размеров в образцах типа «втулка» после ЭКНП производилось в разработанном измерительном приборе. ЗТВ соединения между основным и наваренным металлами исследовалась по макрошлифам с помощью микроскопа Микромед МС-2-ZOOM, а по микрошлифам – микроскопа ММР-4 с видеоокуляром Турсам 5.1 МР. Математическая и

статистическая обработка результатов испытаний проводилась в пакетах Microsoft Excel и PTC Mathcad 15.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

1. Установлен и экспериментально подтвержден механизм повышения твердости покрытия до 270-310 НВ в процессе ЭКН одного-трех слоев низкоуглеродистой сварочной проволоки Св-08Г2С и незначительного снижения ее при наварке второго и третьего слоев ( $\sim 30$  НВ), что вызвано образованием деформированной ферритно-перлитной структуры под действием постоянной пластической деформации и скоростного, без изотермических выдержек, характера нагрева.

2. Показана целесообразность и практическая возможность применения осадки  $\varepsilon$  в качестве легко определяемого и информативного универсального показателя технологии ЭКН проволоки любой марки, в том числе Св-08Г2С, использование которой позволяет однозначно контролировать и оценивать технологические свойства покрытия во всех допустимых интервалах ее изменения.

3. Приведены результаты экспериментальных исследований влияния условий ведения процесса ЭКН сварочной проволокой Св-08Г2С диаметром 2 мм образцов из стали 45 на структуру и свойства наваренного металла. Для этого присадочного материала также подтверждена закономерность роста прочности сцепления покрытия с основой при увеличении осадки  $\varepsilon$ , что объясняется появлением на микрошлифах зон сплавления материала проволоки и образца.

**На защиту выносятся:**

1. Результаты экспериментальных исследований по определению: допустимых режимов ЭКН проволокой Св-08Г2С, выраженных через осадку  $\varepsilon$  для трех групп цилиндрических деталей; прочности сцепления на отрыв наваренного металла с основным из стали 45 при изменении осадки  $55\% \leq \varepsilon \leq 85\%$  сварочной проволоки Св-08Г2С диаметром 2 мм; твердости наружных поверхностей образцов из стали 45 после ЭКН в один-три слоя сварочной проволоки Св-08Г2С диаметром 2 мм при изменении осадки  $50\% \leq \varepsilon \leq 85\%$ ;

2. Методика определения режимов ЭКН (осадки  $\varepsilon$ ) проволоками различных марок и диаметров, в том числе, сварочной Св-08Г2 и  $d_{\text{пр}} = 2$  мм.

**Практическая значимость** работы заключается в следующем:

1. Разработана технология восстановления ЭКН сварочной проволокой Св-08Г2С диаметром 2 мм наружных поверхностей в различных цилиндрических деталях, обеспечивающая достаточную прочность сцепления  $\sigma_{\text{сщ}}$  и твердость ремонтируемых поверхностей в пределах 270-310 НВ, а также значительное повышение производительности процесса ЭКНП.

2. Во внедрении результатов диссертационной работы в опытное производство ООО «НПП «Велд», а также даны рекомендации по применению технологии восстановления ЭКНП для ремонта некоторых деталей следующих предприятий: ОАО «КТЗ», ОАО «КАДВИ», ГП «Калужская МТС», ООО «НПП

«35 механический завод», АО «ДСП», ООО «ВЭРЗ», ООО «ЭЛМАТ», ООО «ТЕПЛОВОЗ», МУП ГЭТ «УКТ» г. Калуги и других.

3. В применении результатов диссертационной работы в качестве методического пособия по курсу «Восстановление и упрочнение деталей машин и механизмов в условиях рыночной экономики» в учебном процессе кафедры М2-КФ «Сварка и диагностика» КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались: на всероссийской научно-технической конференции «Наукоемкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе» (г. Калуга, 2015), на международной научно-практической конференции «Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: теория и практика» (г. Санкт-Петербург, 2016 г.), на научном семинаре кафедры М2- КФ «Сварка и диагностика» КФ МГТУ им. Баумана (г. Калуга, 2018 г.) и на научном семинаре кафедры МТ7 «Технологии сварки и диагностики» МГТУ им. Н.Э. Баумана (г. Москва, 2018 г.).

### **Публикации.**

По результатам выполнения исследований опубликованы 7 научных статей в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

### **Объем работы.**

Диссертация состоит из введения, 5 глав, общих выводов, списка литературы из 88 наименований и 3 приложений. Общий объем работы 205 с., в которых содержится 70 рисунков и 28 таблиц.

## **2. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**В введении** обоснована актуальность исследований, сформулированы положения, определяющие научную новизну и практическую значимость работы, основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** произведен анализ номенклатуры восстанавливаемых цилиндрических деталей, из которых выделены три группы изделий, наружные ремонтируемые поверхности которых работают в разных условиях эксплуатации по отношению к ответным сопрягаемым поверхностям изделий. Первая группа – неподвижные восстанавливаемые поверхности деталей. Вторая и третья группы – изделия, работающие на трение качения или скольжения в различно нагруженных сопрягаемых парах («сталь-бронза», «сталь-чугун», «сталь-пластмасса», «сталь-резина», «сталь-сталь» и т. д.) Общие требования для всех трех групп деталей заключаются в обеспечении твердости наружных поверхностей равной 270-310 НВ и отсутствии необходимости ППД.

Основы технологии ЭКНП в твердой фазе без подплавления соединяемых металлов были разработаны Клименко Ю.В.

Дальнейшее развитие этой технологии представлено в работах Каракозова Э.С., Латыпова Р.А., Молчанова Б.А., Аскинази Б.М., Минибаева И.Ф., Емельянова В.А., Черноиванова В.И., Лелякина В.П., Поляченко А.В., Загирова И.И., Нафикова М.З., Бурака П.И. и других ученых.

Исследование технологии ЭКНП с подплавлением соединяемых металлов проведено сотрудниками ООО «НПП «Велд».

Все ранее выполненные работы по ЭКН были выполнены для высокоуглеродистых и среднеуглеродистых проволок (Нп-65Г, Нп-30ХГСА, Нп-40Х13), что позволяет получить твердость наваренного металла значительно больше 270-310 НВ и не всегда приемлемо для многих деталей.

Предварительные исследования показали, что твердость 270-310 НВ в процессе ЭКН можно получить, используя сварочную проволоку Св-08Г2С, однако комплексного изучения технологических свойств покрытия образцов после наварки таким материалом до настоящего времени не проводили.

Комплексные исследования ЭКНП заключаются в определении количественных значений прочности сцепления  $\sigma_{сц}$ , твердости и износстойкости наружных поверхностей после наварки сварочной проволоки Св-08Г2С диаметром 2 мм образцов из стали 45. Целесообразно определить рост производительности технологии ремонта за счет повышения толщины слоя наваренного металла  $h$  за один проход и обеспечения минимального припуска на мехобработку. Также необходимо оценить возможность образования сплошного бездефектного слоя наваренного металла при ЭКН сварочной проволоки Св-08Г2С и определить основной параметр процесса наварки, выбрав его из тока наварки  $I_h$ , осадки проволоки  $\varepsilon$  и ее осевой деформации  $\eta$ , а также ширины валика наваренного металла  $b$ . Такие исследования необходимо провести при всех возможных (допустимых) значениях режимов наварки (осадки  $\varepsilon$ ) проволоки Св-08Г2С диаметром 2 мм.

**Во второй главе** приведены результаты экспериментальных исследований по определению влияния мягких или жестких режимов ЭКН сварочной проволоки Св-08Г2С диаметром 2 мм на установке УЭН-01 на возможность снижения прочности сцепления покрытия с основным металлом при наварке с осадкой 75%.

Осадка 75% была выбрана по причине наличия в литературе информации о снижении прочности сцепления покрытия с основой при ЭКН с большой осадкой на жестком режиме. Влияние жестких и мягких режимов на появление трещин в покрытии после ЭКН двумя сварочными проволоками Св-08Г2С диаметром 2 мм исследовали на образцах типа «вал» из стали 45 диаметром  $D = 30$  мм, которые наваривали с осадкой  $\varepsilon = 75\%$  по двухзаходной схеме (Рисунок 1 а, б).

Во всех случаях усилие сжатия электродов составляло  $P = 1,5$  кН, а необходимое число оборотов  $n$  (скорость наварки) установки УЭН-01 определяли в зависимости от диаметра образцов  $D$ . На макрошлифах образцов, наваренных на жестком режиме (время импульса  $t_i = 0,04$  с, время паузы  $t_n = 2t_i$ , ток наварки  $I_h = 11$  кА, шаг наварки  $m = 3,5$  мм, скорость вращения заготовки  $n = 85/D$ ), были обнаружены трещины в покрытии. При ЭКНП на мягком режиме они отсутствовали ( $t_i = 0,1-0,12$  с,  $t_n = 2t_i$ ,  $I_h = 5$  кА,  $m = 3,5$  мм,  $n = 85/D$ ) (Рисунок 2 а, б). Полученный результат объясняется разным распределением тепла при ЭКНП изделий на мягких и жестких режимах наварки и вызван перегревом присадочной проволоки, а также недостаточным

нагревом восстанавливаемой детали, что приводит к растрескиванию покрытия на жестких режимах при больших осадках  $\varepsilon$ .

Таким образом, для всех дальнейших исследований был выбран мягкий режим наварки, как наиболее подходящий при любых значениях осадки  $\varepsilon$ , изменяющейся при варьировании тока  $I_h$ .

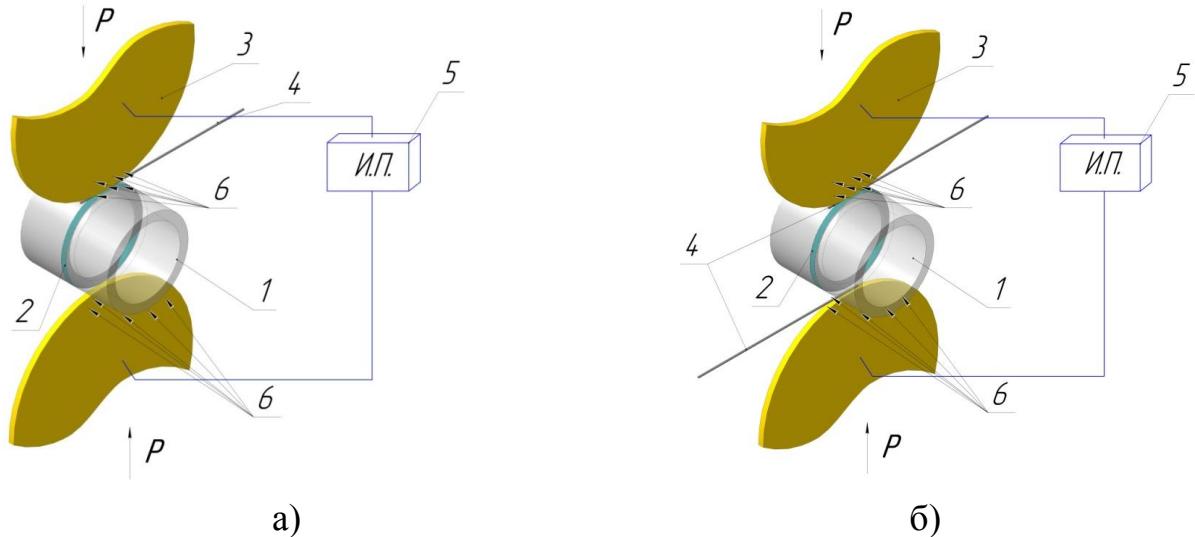


Рисунок 1. Двухзаходные схемы ЭКН одной (а) и двумя (б) проволоками, где: 1 – восстанавливаемая деталь; 2 – путь прохождения тока наварки  $I_h$ ; 3 - электроды из бериллиевой бронзы; 4 – присадочные проволоки; 5 – источник питания и электрический силовой контур установки; 6 – вода, охлаждающая электроды и деталь; Р – усилие сжатия электродов.

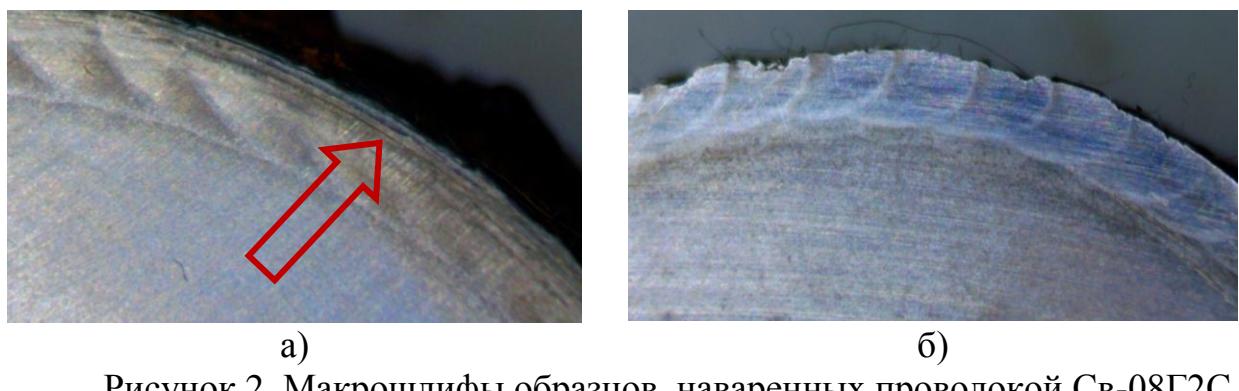


Рисунок 2. Макрошлифы образцов, наваренных проволокой Св-08Г2С с применением жестких (а) и мягких (б) режимов с осадкой  $\varepsilon = 75\%$ . Увеличение  $\times 20$ .

В этой главе также представлены результаты экспериментальных исследований, подтверждающие преимущества использования осадки проволоки  $\varepsilon$  в качестве основного параметра процесса ЭКНП, с которым удобно связывать технологические свойства наваренного металла.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований технологических свойств наваренного покрытия после ЭКН сварочной проволокой Св-08Г2С диаметром 2 мм образцов-валов и втулок, изготовленных из стали 45 в зависимости от изменения осадки проволоки  $\varepsilon$ .

(тока  $I_h$ ). Наварку производили в исследовательском интервале с осадками  $40\% \leq \varepsilon \leq 90\%$  и изучали технологические свойства наваренного покрытия (сплошность, прочность сцепления, твердость, отсутствие дефектов) после ЭКНП. Было установлено, что прочное соединение наваренного металла с основным, не отслаивающееся при механической обработке, образуется при наварке сварочными проволоками Св-08Г2С разного диаметра с осадкой  $\varepsilon \geq 50\%$ , что отличается от наварки проволоки Нп-65Г ( $\varepsilon \geq 40\%$ ). ЭКН сварочной проволоки Св-08Г2С диаметром 2 мм ограничивали осадкой  $\varepsilon \leq 85\%$  из-за налипания электродной бронзы на сталь, а при наварке на больших режимах ( $85\% \leq \varepsilon \leq 90\%$ ) использовали проволоку диаметром 1,6 мм. По результатам исследований были установлены технологические интервалы изменения осадки  $\varepsilon$  проволоки Св-08Г2С диаметром 2,0 мм и 1,6 мм, в которых обеспечивается образование сварных соединений между основным металлом из стали 45 и валиками наваренного, которые не отслаиваются при механической обработке и не имеют дефектов. Технологические интервалы для проволоки Св-08Г2С диаметром 1,6 мм и 2 мм соответственно равны  $50\% \leq \varepsilon \leq 90\%$  и  $50\% \leq \varepsilon \leq 85\%$ .

Для получения количественных значений прочности сцепления  $\sigma_{sc}$ , между присадочными и основным металлами из стали 45 были проведены сравнительные экспериментальные исследования.

Прочности сцепления  $\sigma_{sc}$  между металлами определяли после ЭКН одной сварочной проволоки Св-08Г2С диаметром 2 мм с осадкой  $50\% \leq \varepsilon \leq 85\%$ , плазменного напыления без оплавления порошком ПТ-Ю5Н и механизированной дуговой наплавки в углекислом газе сварочной проволоки Св-08Г2С диаметром 1,2 мм поверхности специальных разборных образцов. Результаты этих исследований приведены на Рисунке 3.

Прочности сцепления  $\sigma_{sc}$  покрытия, полученного плазменным напылением порошком ПТ-Ю5Н без оплавления и дуговой механизированной наплавкой сварочной проволоки Св-08Г2С диаметром 1,2 мм, с основой были определены равными 33 МПа и 450 МПа, что близко к данным других исследователей.

Прочность сцепления  $\sigma_{sc}$  покрытия с основой после ЭКН сварочной проволоки Св-08Г2С линейно возрастает от 150 МПа ( $\varepsilon = 50\%$ ) до 430 МПа ( $\varepsilon = 85\%$ ). Затем было выполнено сравнение с литературными данными по прочности сцепления  $\sigma_{sc}$ , которая достигается при плазменном напылении с оплавлением и считается вполне достаточной для большинства деталей (Рисунок 3).

Зависимость количественных значений средней твердости наваренного металла при изменении осадки  $\varepsilon$  сварочной проволоки Св-08Г2С после ЭКН образцов из стали 45, представлена на Рисунке 4. Видно, что при увеличении осадки проволоки Св-08Г2С с 50 до 85% средняя твердость покрытия составляет 290 НВ и изменяется от 270 до 310 НВ, что в  $\sim 1,5\text{-}2$  раза выше, чем при механизированной дуговой наплавке в углекислом газе (180-210 НВ). Нужно отметить, что в отличие от дуговой наплавки, твердость наваренного ЭКН металла стабильна и крайне незначительно изменяется в зависимости от

количества наваренных слоев С или материала основы (Рисунок 5). Это обусловлено почти полным отсутствием перемешивания при выполнении ЭКН, хотя переход элементов из основного в наваренный металл все же присутствует и отмечается другими исследователями, но его влияние на технологические параметры покрытия минимально.

Отсутствие дефектов в наваренном слое является очень важным параметром, характеризующим качество покрытия при ЭКНП. Макрошлифы наваренного покрытия показаны на Рисунке 6. Дефектов, в виде пор, раковин и трещин после ЭКН образцов в интервале осадки проволоки  $50\% \leq \varepsilon \leq 85\%$  на макрошлифах не обнаружено. Не установлено также шелушения и отслоения наваренного металла при механической обработке наружных поверхностей образцов в допустимых интервалах изменения осадки проволоки  $\varepsilon$ .

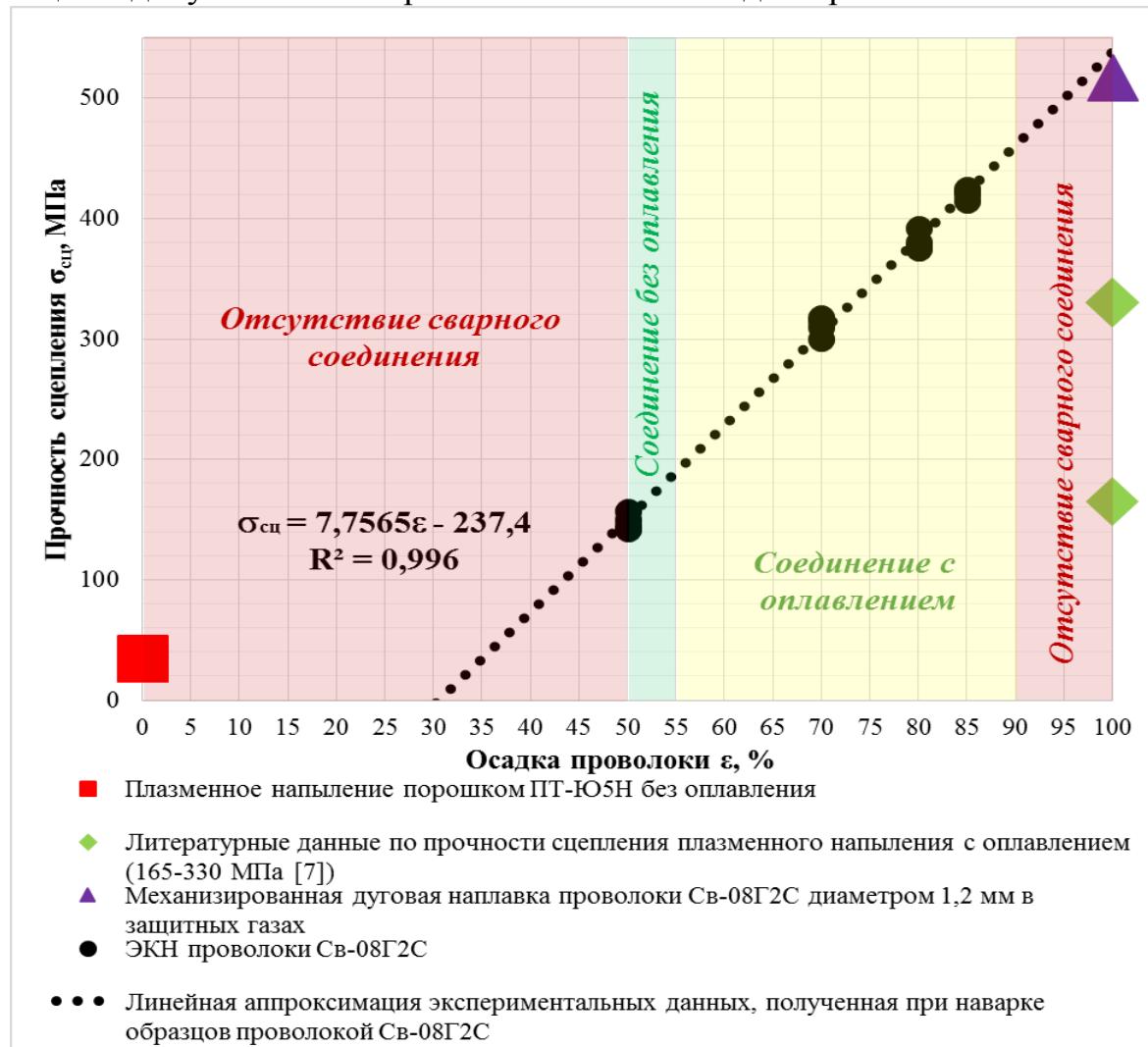


Рисунок 3. Зависимость прочности сцепления  $\sigma_{\text{сц}}$  покрытия, полученного ЭКН одной сварочной проволоки Св-08Г2С диаметром 2 мм с основой, от осадки  $\varepsilon$  после наварки на образцы из стали 45.

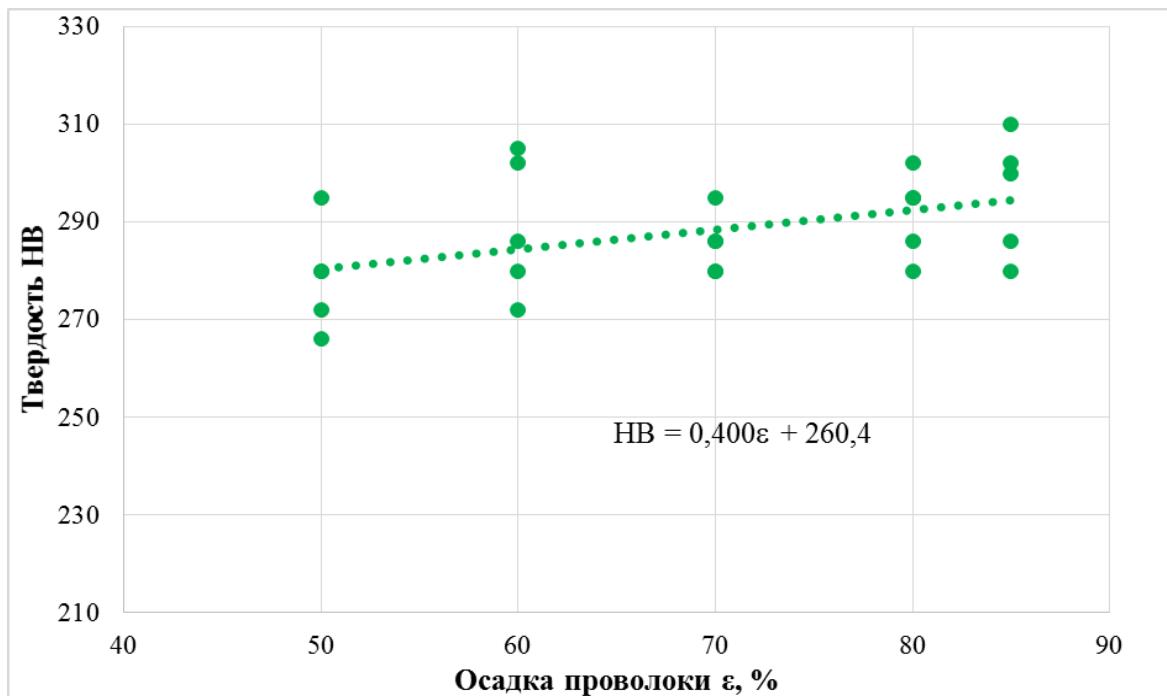


Рисунок 4. Изменение твердости наружного покрытия, полученного после ЭКН в один слой сварочной проволоки Св-08Г2С с разными осадками ε.

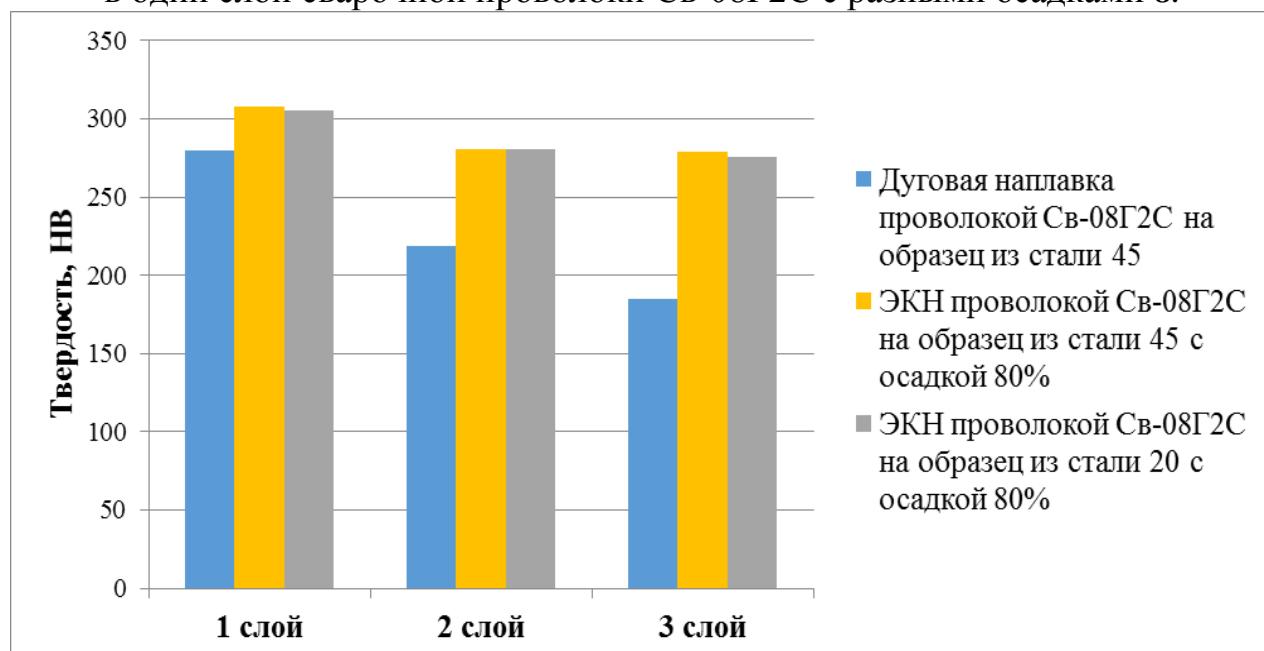


Рисунок 5. Изменение твердости наружного покрытия после ЭКН проволоки Св-08Г2С и дуговой наплавки в СО<sub>2</sub> образцов из сталей 45 и 20

Результаты металлографических исследований показали, что при ЭКН образцов из стали 45 низкоуглеродистой сварочной проволокой Св-08Г2С на режимах с осадкой ε равной 50% (без подплавления соединяемых металлов), наваренный слой металла разделен с основным хорошо различимой границей (Рисунок 7, а). По мере увеличения осадки ε ≥ 55% граница раздела начинает исчезать (Рисунок 7, б) и появляются общие зерна, что объясняет рост прочности сцепления покрытия с основой с 200 МПа до 430 МПа.

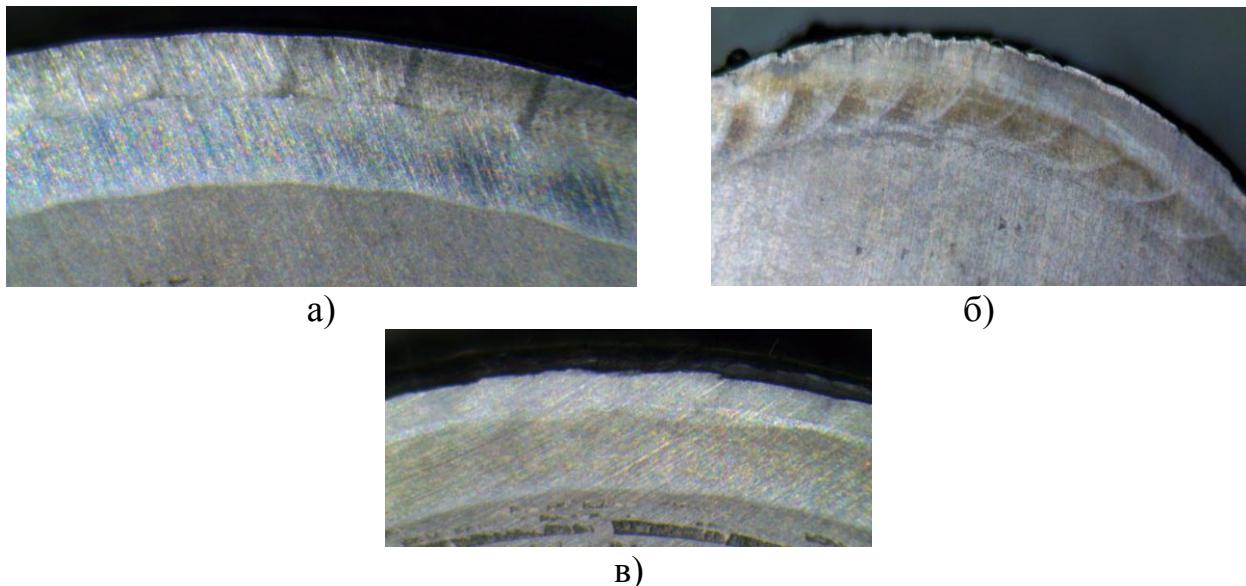


Рисунок 6. Макрошлифы образцов, наваренных сварочной проволокой Св-08Г2С диаметром 2 мм на режимах с разными значениями осадки  $\varepsilon$ . а – осадка  $\varepsilon = 50\%$ , б – осадка  $75\%$ , в – осадка  $80\%$ . Увеличение  $\times 20$

Упрочнение металла после ЭКН низкоуглеродистой сварочной проволоки Св-08Г2С (в среднем) до 30 HRC (290 HB) (Рисунки 4, 5) можно объяснить только пластическим деформированием сварочной проволоки роликовым электродом, так как химический состав проволоки практически исключает образование закалочных структур. Не обнаружены они и при исследовании микроструктуры ЗТВ и наваренного металла.



Рисунок 7. Микроструктуры (увеличение  $\times 240$ ) образцов из стали 45 после ЭКН проволоки Св-08Г2С с осадками  $\varepsilon$  равными 50% (а) и 80% (б)

При ЭКН на мягких режимах сварочной проволоки Св-08Г2С граница раздела процессов наварки на «без подплавления» и «с подплавлением» соединяемых металлов установлена при осадке  $\epsilon = 55\%$  (для Нп-65Г это значение  $\epsilon = 70\%$ ), а интервал отсутствия подплавления составляет всего 5% ( $50\% \leq \epsilon \leq 55\%$ ) (Рисунок 3). Установлено, что граница  $\epsilon = 55\%$  достаточно условна, так как изменение режимов ЭКН в интервале осадки сварочной проволоки Св-08Г2С  $50\% \leq \epsilon \leq 85\%$ , не оказывает негативного влияния на технологические свойства наваренного металла, а, следовательно, и нет необходимости в ее особом выделении.

В итоге, систематизировав полученные результаты и установив зависимость режимов ЭКНП через осадку  $\epsilon$  сварочной проволоки Св-08Г2С диаметром 2 мм с технологическими свойствами наваренной поверхности, были определены допустимые интервалы ее изменения для трех групп изделий, которые представлены в Таблице 1. При использовании наварки одной проволоки, нижний предел осадки  $\epsilon$  можно уменьшить на 5% для деталей 2 группы (Таблица 1).

Нижние границы в допустимом интервале изменения осадки  $\epsilon$  первой группы деталей не отличаются от нижних значений этого интервала при ЭКН одной, а также двумя проволоками и составляют 55%.

Указанные значения осадки  $\epsilon$  определены по результатам механической обработки наваренных образцов – по отсутствию шелушения и отслоения в месте контакта свариваемых материалов между собой. Отсутствие шелушения при ЭКН одной и двумя сварочными проволоками Св-08Г2С диаметром 2 мм установлено для осадки  $\epsilon \geq 55\%$ . Нижние значения осадки проволоки  $\epsilon$  второй и третьей групп изделий установлены, соответственно, на величине 60 и 65% на основании статистических данных эксплуатации таких деталей после ЭКН на разных режимах наварки образцов (Таблица 1).

Таблица 1.

Допустимые интервалы изменения осадки  $\epsilon$  при ЭКН двумя сварочными проволоками Св-08Г2С диаметром 2,0 мм

1 группа	$55\% \pm 2\% \leq \epsilon \leq 80\% \pm 2\%$ ;
2 группа	$60\% \pm 2\% \leq \epsilon \leq 80\% \pm 2\%$ ;
3 группа	$65\% \pm 2\% \leq \epsilon \leq 80\% \pm 2\%$ ;

Примечание. При ЭКН сварочной проволоки Св-08Г2С диаметром 1,6 мм допустимые интервалы осадки для всех групп деталей составляют  $70\% \leq \epsilon \leq 85\%$ .

В указанных допустимых интервалах осадка проволоки  $\epsilon$  может быть любой и для каждой конкретной детали она должна определяться из условия выполнения ЭКНП за минимальное количество наваренных слоев С.

Такой подход к выбору режимов наварки является принципиально новым. Повышение производительности процесса ЭКНП, составляет от 20 до 60%, в зависимости от группы деталей и сравниваемых значений режимов наварки. Результат достигается за счет увеличения высоты наваренного валика  $h$  (1) и

уменьшения его ширины  $b$  (при постоянном шаге  $m = 3,5$  мм), при сопутствующем снижении прочности сцепления  $\sigma_{\text{сц}}$  покрытия с основным металлом и перекрытия между валиками.

Допустимые интервалы изменения осадки проволоки  $\varepsilon$  представлены таким образом, что прочность сцепления достаточна для надежной работы деталей в эксплуатации даже при минимальных режимах ЭКНП и увеличивается при переходе от первой ко второй и третьей группам деталей. При этом минимальное перекрытие валиков металла (при наименьших допустимых осадках  $\varepsilon$ ), наваренных проволокой Св-08Г2С диаметром 2 мм, составляет 10-15% и обеспечивает сплошное покрытие наружных поверхностей изделий без проскоков.

**В четвертой главе** представлены основные положения методики определения осадок  $\varepsilon_1$  или  $\varepsilon_2$  (режимов ЭКНП) в установленных допустимых интервалах (Таблица 1). ЭКНП каждой конкретной детали должна выполняться на режимах, которые обеспечивают устранение фактических износов наружных поверхностей изделий за минимальное количество слоев С при ЭКН одной или двумя сварочными проволоками Св-08Г2С.

Наименьшая из осадок проволок  $\varepsilon_1$  или  $\varepsilon_2$  (режимов наварки) определяется в процентах соответственно при наварке одной или двумя проволоками по формулам (3):

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= \left[ 1 - (\Delta_{\text{изн}} + \Delta_{\text{прип}} + \Delta_{\text{ос}} \cdot i) / C \cdot d_{\text{пр}} \right] \cdot 100\% ; \\ \varepsilon_2 &= \left[ 1 - (\Delta_{\text{изн}} + \Delta_{\text{прип}} + \Delta_{\text{ос}} \cdot i) / 2C \cdot d_{\text{пр}} \right] \cdot 100\% ,\end{aligned}\quad (3)$$

где,  $\Delta_{\text{изн}}$ ,  $\Delta_{\text{прип}}$ ,  $\Delta_{\text{ос}}$  – соответственно износ наружной поверхности детали и припуск на ее механическую обработку после наварки, а также возможное уменьшение восстановляемого диаметра изделия  $D$ , в случае применения технологии электроконтактной поверхностной осадки (ЭКПО), мм.  $i$  – количество проходов ЭКПО, от 1 до 2;  $C$  – количество слоев ЭКНП, от 1 до 3;  $d_{\text{пр}}$  – диаметр присадочной проволоки, как правило, 2 мм.

ЭКПО – технология, выполняемая, как ЭКНП, на установке УЭН-01, но без подачи присадочных проволок под бронзовые электроды и применяемая с целью увеличения припуска на механическую обработку внутренних размеров в деталях типа «втулка».

По формулам (3) подбор режимов ЭКНП (осадки  $\varepsilon_1$  или  $\varepsilon_2$ ) наружных поверхностей в деталях типа «вал» или «втулка» одинаков. Однако, из-за наличия внутренних отверстий в изделиях типа «втулка», технологии их восстановления ЭКНП могут отличаться от способа ремонта деталей типа «вал». Эти возможные отличия учитываются (по методике ООО «НПП «Велд») выбором одной из пяти технологий ремонта таких деталей на основании прогнозирования в них качественных значений остаточных радиальных перемещений размеров.

**В пятой главе** приведена методика выбора рациональных режимов ЭКН (осадки  $\varepsilon$ ) сварочной проволоки Св-08Г2С диаметром 2 мм наружных поверхностей в различных цилиндрических деталях типа «вал» или «втулка».

Способы ремонта ЭКНП деталей типа «вал» и «втулка» должны обязательно включать в себя указание группы изделий, технологической схемы восстановления, осадки  $\varepsilon$ , скорости наварки ( $n = 85/D$ ), усилия сжатия электродов  $P = 1,5$  кН, времени импульса  $t_i = 0,1$  с и паузы  $t_n = 0,2$  с.

В конце диссертационной работе приведены три приложения. В третьем приложении представлены фотографии успешно восстановленных по предлагаемой технологии ЭКН сварочной проволоки Св-08Г2С диаметром 2 мм деталей типа «вал» и «втулка» и приведены примеры определения режимов наварки (осадки проволоки  $\varepsilon$ ) в таких изделиях.

### **3. ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

1. Установлены технологические ( $50\% + 2\% \leq \varepsilon \leq 90\% \pm 2\%$  и  $50\% + 2\% \leq \varepsilon \leq 85\% \pm 2\%$ ) и допустимые (Таблица 1) интервалы изменения осадки  $\varepsilon$  (режимы наварки) соответственно при ЭКН одной и двумя проволоками Св-08Г2С диаметром 1,6-2 мм наружных поверхностей трех групп цилиндрических деталей в зависимости от условий их работы.

2. Установлено и экспериментально доказано, что в допустимых интервалах изменения режимов ЭКН проволоки Св-08Г2С диаметром 2 мм (осадка  $\varepsilon$ ) трех групп деталей всегда присутствует подплавление между основным и наваренным металлами (что отличается от наварки проволоки Нп-65Г диаметром 2 мм), наличие которого не оказывает отрицательного влияния на технологические свойства покрытия.

3. Установлено и экспериментально доказано, что твердость наружных поверхностей различных цилиндрических изделий после ЭКН сварочной проволоки Св-08Г2С выше твердости наплавленного металла после механизированной дуговой наплавки в защитных газах проволокой аналогичной марки примерно в полтора-два раза, из-за значительной пластической деформации присадочного материала, сопровождающейся образованием соответствующих структур.

4. Даны практические рекомендации по выбору режимов наварки трех групп цилиндрических деталей, изготовленных из стали 45 или ее аналогов, в зависимости от степени износа поверхности, их наружных диаметров  $D$  и толщин стенок  $S$ .

На основании результатов диссертационной работы Амеличевой А.Ю. снижены материальные и трудовые затраты на ЭКН проволоки Св-08Г2С диаметром 2 мм наружных поверхностей цилиндрических деталей, что позволило получить в ООО «НПП «Велд» экономический эффект 715000 рублей.

#### **Основное содержание диссертации отражено в публикациях:**

1. Дубровский В.А., Потапов А.В., Амеличева А.Ю., Карчагин А.В. Определение оптимальных технологий восстановления наружных поверхностей в цилиндрических и конических деталях типа «втулка» на основании предполагаемых радиальных формоизменений размеров от

электроконтактной наварки проволокой. Часть 1. Основные положения и понятия // Сварка и диагностика. 2015. №5. С. 60-64.

2. Дубровский В.А., Потапов А.В., Амеличева А.Ю., Карчагин А.В. Определение оптимальных технологий восстановления наружных поверхностей в цилиндрических и конических деталях типа «втулка» на основании предполагаемых радиальных формоизменений размеров от электроконтактной наварки проволокой. Часть 2. Примеры выбора оптимальных технологий ремонта деталей типа «втулка» // Сварка и диагностика. 2015. №6. С. 45-50.

3. Дубровский В.А., Зезюля В.В., Зыбин И.Н., Потапов А.В., Амеличева А.Ю. Расчет остаточных радиальных и осевых формоизменений размеров в деталях типа «втулка» из стали 45 при электроконтактной наварке проволокой // Сварка и диагностика. 2016. №4. С. 46-50.

4. Дубровский В.А., Потапов А.В., Амеличева А.Ю., Зезюля В.В., Зыбин И.Н. Текущее состояние и направления дальнейшего развития технологии электроконтактной наварки проволокой // Сварка и диагностика. 2017. №3. С.30-33.

5. Дубровский В.А., Амеличева А.Ю., Потапов А.В., Зезюля В.В., Зыбин И.Н. Технологические и допустимые интервалы изменения осадки проволоки при электроконтактной наварке различных групп деталей // Сварка и диагностика. 2017. №5. С. 54-61.

6. Дубровский В.А., Амеличева А.Ю., Потапов А.В., Зезюля В.В., Головачева Ю.Г., Меньшиков В.С. Экспериментальные исследования технологических свойств металлических покрытий в наружных поверхностях цилиндрических образцов после электроконтактной наварки различными проволоками // Сварка и диагностика. 2018. №1. С. 27-32.

7. Дубровский В.А., Амеличева А.Ю., Потапов А.В., Зыбин И.Н., Зезюля В.В., Меньшиков В.С. Определение рациональных режимов электроконтактной наварки проволокой наружных поверхностей в цилиндрических деталях // Сварка и диагностика. 2018. № 3. С. 31-37.