

На правах рукописи
УДК 621.791

Потапов Алексей Вячеславович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ НАРУЖНЫХ
ПОВЕРХНОСТЕЙ В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЯХ ТИПА
«ВТУЛКА» ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ НАВАРКОЙ ПРОВОЛОКИ**

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
ШОЛОХОВ Михаил Александрович
ООО «ШТОРМ», директор

кандидат технических наук, доцент

АНТОНОВ Алексей Алексеевич

РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М.Губкина,
кафедра сварки и мониторинга нефтегазовых
сооружений, доцент

Ведущая организация: **Национальный исследовательский
университет «МЭИ», г. Москва**

Защита состоится «25» апреля 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.



Прилуцкий М.А.

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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

Одним из путей решений этой задачи является внедрение современных ресурсосберегающих технологий восстановления изношенных деталей машин и механизмов, к которым также относится и способ электроконтактной наварки (ЭКНП) наружных поверхностей изделий по двухзаходной схеме одной или двумя проволоками (Рисунок 1 а, б). ЭКНП выполняют, как правило, в один слой, иногда в два и очень редко в три.

Проведенный в ООО «НПП «Велд» анализ имеющихся опытных данных, о работе восстановленных ЭКНП деталей в эксплуатации, показал наибольшую целесообразность применения этой технологии для ряда изделий, в том числе, работающих на трение качения или скольжения и имеющих твердость наружных поверхностей деталей 20-60 HRC.

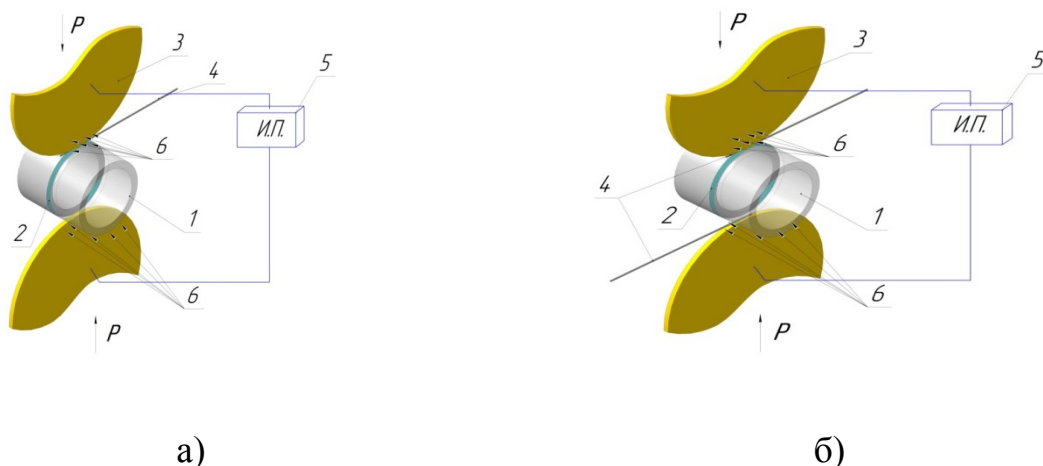


Рисунок 1. Двухзаходные схемы ЭКН одной (а) и двумя (б) проволоками, где: 1 - восстанавливаемая деталь; 2 - путь прохождения тока наварки I_n ; 3 - электроды из бериллиевой бронзы; 4 - присадочные проволоки; 5 - источник питания и электрический силовой контур установки; 6 - вода, охлаждающая электроды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

В предлагаемой работе рассматриваются две группы деталей типа «втулка» (Рисунок 2,а), которые в процессе эксплуатации работают на трение скольжения или качения и имеют твердость наружных поверхностей не менее 50 HRC, что можно вполне обеспечить при ЭКН недефицитной и недорогой проволокой Нп-65Г отечественного производства. Наиболее целесообразно, по техническим и экономическим соображениям, использовать при ЭКН максимально возможный диаметр проволоки 2 мм. По данным ООО «НПП «Велд» на долю различных деталей, которые восстанавливают на предприятии

проволокой Нп-65Г, приходится примерно 60-70%. В свою очередь, объем изделий, навариваемых этой проволокой, делится приблизительно поровну на детали типа «вал» (Рисунок 2,б) и «втулка».

Очень часто приходится восстанавливать дорогостоящие изделия, изготовленные из стали 45 и ее аналогов, в состоянии поставки или после термической обработки. В настоящее время, как правило, ремонт деталей носит единичный и, в некоторых случаях, мелкосерийный характер, что существенно отличает его от серийного восстановления изделий, который выполнялся в советский период. Нередко ремонт разовых дорогостоящих изделий усложняется отсутствием технической документации и технологической оснастки для деталей как отечественного, так и импортного производства, поэтому выполнение единичных заказов превращается в небольшую научно-исследовательскую работу, направленную на поиск решений, выполнение которых, позволит обеспечивать требуемые технические характеристики восстанавливаемых изделий.

Одним из обязательных первоначальных исследований является определение предела текучести σ_T основного металла восстанавливаемого изделия (по твердости изношенной поверхности детали или иным способом).

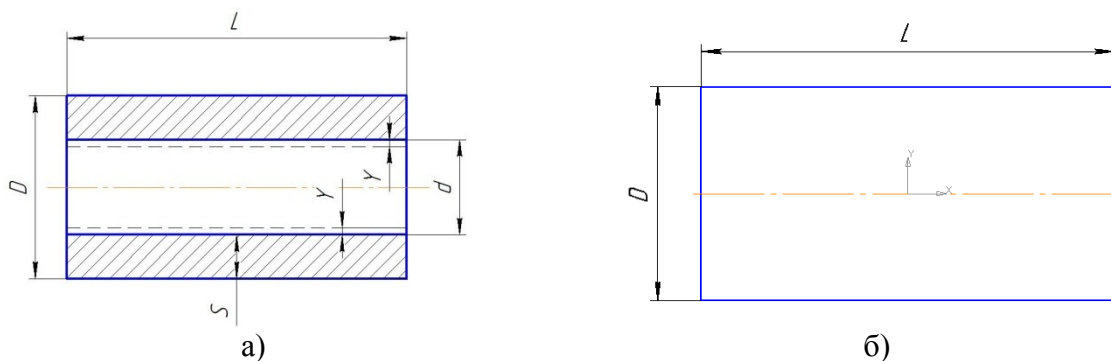


Рисунок 2. Цилиндрические детали (образцы) типа «втулка» (а) и «вал» (б),

где D – наружный диаметр, мм; L – длина, мм; S – толщина стенки, мм; Y и $2Y$ – изменение радиального размера после ЭКНП, мм, соответственно на сторону или внутренний диаметр.

Очень часто в практике ремонта встречаются изделия типа «втулка», восстанавливать которые наиболее сложно и трудоемко, чем детали типа «вал», что, в первую очередь, связано с возможным появлением остаточных радиальных (поперечных) перемещений (изменений) размеров в их внутренних отверстиях (Рисунок 2, а).

Остаточные поперечные изменения размеров после ЭКНП, в некоторых случаях, могут приводить к окончательному, а чаще всего, к исправимому браку, восстанавливаемых изделий типа «втулка». Для предотвращения брака очень часто приходится изготавливать технологическую оснастку в виде распоров, так как не всегда для этих целей бывает можно использовать ответные детали типа «вал».

Однако в ряде случаев принимаемые меры по предотвращению остаточных радиальных перемещений размеров абсолютно не обоснованы, так как ЭКНП деталей типа «втулка», не всегда приводит к остаточным поперечным изменениям размеров.

В данной работе предлагается методика восстановления ЭКНП изношенных наружных поверхностей в цилиндрических деталях типа «втулка», направленная на прогнозирование и предупреждение случаев появления окончательного или исправимого брака при наварке таких единичных изделий. На основании ожидания количественных значений остаточных радиальных изменений размеров, предлагается выбирать и выполнять различные технологии ремонта деталей типа «втулка», тем самым, исключая случаи появления окончательного или исправимого брака.

Предлагаемая методика восстановления ЭКН деталей типа «втулка» рассмотрена для наиболее часто применяемых в производстве размеров изделий ($50\text{мм} \leq D \leq 100\text{мм}$ и $4\text{мм} \leq S \leq 16\text{мм}$) и материалов - проволоки Нп-65Г и стали 45. Она может применяться и для других размеров деталей, а также основных и присадочных материалов, при наличии количественные значения остаточных поперечных перемещений размеров, определенных экспериментальными или расчетными методами.

В данной работе количественные значения остаточных радиальных перемещений размеров в образцах типа «втулка» после ЭКН проволоки Нп-65Г диаметром 2мм образцов из стали 45 определены экспериментально. Были определены основные факторы и исследовано их влияние на основные закономерности изменения количественных значений остаточных радиальных перемещений размеров в деталях типа «втулка» во всем диапазоне варьирования осадки ϵ после ЭКН проволоки Нп-65Г в один-три слоя С. Затем, применяя метод планирования эксперимента, установлено совместное влияние основных факторов на поперечные изменения внутренних размеров изделий.

Были выполнены также исследования, направленные на расчет поперечных изменений размеров методом конечных элементов (МКЭ) в программе ANSYS WB, в которых моделирование производится с помощью теории неизотермического пластического течения. Приращение полной деформации ϵ_{ij} определяется суммой (1):

$$d\epsilon_{ij} = d\epsilon_{ij}^e + d\epsilon_{ij}^p + \delta_{ij}d\epsilon^T \quad (1)$$

где ϵ_{ij}^e и ϵ_{ij}^p - компоненты тензора упругой и пластической составляющей полной деформации, ϵ^T - температурная деформация, δ_{ij} - символ Кронекера.

Однако моделирование было проведено без учета наращивания металла на поверхности втулки при ЭКНП первого-третьего слоев С и структурных превращений в них, в силу ограничений модели. То есть, численное определение количественных значений остаточных поперечных изменений размеров в изделиях типа «втулка» выполняется по схеме электроконтактной поверхностной осадки (ЭКПО), аналогично ЭКНП (Рисунок 1, а, б), но без подачи присадочной проволоки под электроды. Известно, что при выполнении

одного прохода ЭКПО и одного слоя ЭКН на одинаковых режимах остаточные изменения размеров близки по величине. Однако неизвестна закономерность изменения количественных значений остаточных радиальных перемещений в деталях типа «втулка» на одинаковых режимах при ЭКПО в два - три прохода i по сравнению с фактическим изменением размеров при ЭКНП таких изделий в два-три слоя С.

Все вышесказанное показывает актуальность проведения дальнейших исследований, направленных на изучение влияния ЭКН проволоки Нп-65Г диаметром 2мм на изменение остаточных поперечных изменений размеров в деталях типа «втулка» и предупреждение случаев появления брака от наварки.

Целью диссертационной работы является прогнозирование и предупреждение случаев появления окончательного или исправимого брака в деталях типа «втулка» при ЭКН проволоки Нп-65Г диаметром 2мм изношенных наружных цилиндрических поверхностей в таких изделиях в условиях единичного ремонтного производства.

Для достижения поставленной цели в работе необходимо решить следующие **задачи**:

1. Исследовать и установить интервалы изменения осадки ε (режимы наварки) при ЭКН наружных поверхностей цилиндрических образцов из стали 45 одной и двумя проволоками Нп-65Г диаметром 2мм в которых происходят образования сварных соединений между основным и наваренным металлами.
2. Исследовать технологические свойства наружного покрытия (сплошность, прочность сцепления, твердость и наличие дефектов) после ЭКН образцов из стали 45 проволокой Нп-65Г диаметром 2мм в установленных интервалах изменения осадки ε (режимов наварки).
3. Исследовать изменение остаточных радиальных перемещений размеров в образцах типа «втулка», с разными наружными диаметрами D и толщинами стенок S , после ЭКН в один - пять слоев С проволокой Нп-65Г диаметром 2,0 мм, при варьировании осадки в интервале $50\% \leq \varepsilon \leq 80\%$ и пределе текучести основного металла $\sigma_T = 530 \text{ МПа}$;
4. Исследовать изменение остаточных поперечных перемещений размеров в образцах типа «втулка», с разными наружными диаметрами D и толщинами стенок S , после ЭКПО в один – три прохода i на режимах ЭКНП;
5. Исследовать изменение остаточных радиальных перемещений размеров в образцах типа «втулка» из стали 45 после ЭКН проволоки Нп-65Г диаметром 2мм для одного – трех наваренных слоев С, в зависимости от варьирования твердости основного металла изделий $22 \leq \text{HRC} \leq 62$, его предела текучести $400 \text{ МПа} \leq \sigma_T \leq 1200 \text{ МПа}$ и осадки $50\% \leq \varepsilon \leq 80\%$.
6. Установить эмпирические зависимости изменения остаточных поперечных перемещений размеров в цилиндрических образцах типа «втулка», после ЭКН проволоки Нп-65Г диаметром 2мм для одного – трех наваренных слоев С, при варьировании геометрических размеров D и S , осадки в интервале $50\% \leq \varepsilon \leq 80\%$ и пределе текучести основного металла из стали 45 равного $\sigma_T = 530 \text{ МПа}$;

7. Разработать методику ЭКН проволоки Нп-65Г диаметром 2мм наружных поверхностей в цилиндрических деталях типа «втулка» и довести результаты диссертационной работы до внедрения в опытное производство ООО «НПП «Велд», а также применения в качестве методического пособия в учебном процессе кафедры М2–КФ «Технологии сварки и диагностики» КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Методы исследования.

Для достижения поставленной цели использовали экспериментальный и расчетный методы исследования. ЭКНП образцов производили на установке УЭН-01. Исследование прочности сцепления $\sigma_{\text{сц}}$ выполняли на разрывной машине МИ-40У в разборном образце. Измерение твердости полученных покрытий производилось по ГОСТ 9013-59 на твердомерах ТК-2М. Определение остаточных радиальных перемещений размеров в образцах типа «втулка» после ЭКНП производили в разработанном измерительном приборе. Исследование ЗТВ соединения основного и наваренного металлов выполняли с применением макрошлифов образцов, используя микроскоп Микромед МС-2-ZOOM, а для микрошлифов – микроскоп ММР-4 с видеоокуляром Toupsam 5.1 MP. Математическую и статистическую обработку результатов испытаний проводили в пакетах Microsoft Excel и PTC Mathcad 15.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Установлено и экспериментально доказано, что существуют принципиальные различия в основных закономерностях изменения количественных значений остаточных радиальных перемещений размеров в образцах типа «втулка» после ЭКНП и ЭКПО:

- после ЭКН деталей типа «втулка» проволокой Нп-65Г зависимость остаточных радиальных перемещений от режимов наварки для 1 – 3 слоев описывается полиномов 1-го порядка, а для 1 – 5 слоев – полиномом 2-го порядка;
- после ЭКПО деталей типа «втулка» зависимость остаточных радиальных перемещений от режимов осадки для 1 – 5 проходов описывается полиномов 1-го порядка.

Данные различия обусловлены разными тепловложениями, темпами изменения площадей поперечных сечений изделий, размерами ЗТВ и зон пластических деформаций при осадке и наварке.

2. Установлено и экспериментально подтверждено, что в образцах типа «втулка» с ростом осадки проволоки с 60% до 85%, увеличение остаточных радиальных перемещений составляет не более 0,25мм для всего диапазона предела текучести основного металла ($380\text{МПа} \leq \sigma_T \leq 1180\text{МПа}$) и количества наваренных слоев от 1 до 3.

На защиту выносятся:

- Методика восстановления ЭКН проволоки Нп-65Г диаметром 2мм наружных поверхностей в цилиндрических деталях типа «втулка».
- Количественные значения остаточных радиальных перемещений размеров $2Y$ в деталях типа «втулка» для диаметров $D=50-100\text{мм}$, толщин

стенок $S=4-16\text{мм}$, осадке $50\%\leq\epsilon\leq85\%$ после ЭКН проволоки Нп-65Г диаметром 2мм одного-трех слоев С и пределе текучести основного металла изделий из стали 45 равного 530МПа.

- Экспериментальные зависимости изменения количественных значений остаточных радиальных перемещений размеров $2Y$ при варьировании предела текучести $380\text{МПа}\leq\sigma_t\leq1180\text{МПа}$ основного металла в деталях типа «втулка» диаметром $D=50-100\text{мм}$, толщинами стенок $S=4-16\text{мм}$, осадке $50\%\leq\epsilon\leq85\%$ после ЭКН проволоки Нп-65Г диаметром 2мм одного-трех слоев С.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Разработана методика восстановления ЭКН проволоки Нп-65Г диаметром 2мм наружных поверхностей в цилиндрических деталях типа «втулка», с помощью которой предлагается прогнозировать и предупреждать случаи появления окончательного или исправимого брака при ремонте таких изделий.
2. Во внедрении результатов диссертационной работы в опытное производство ООО «НПП «Велд», а также даны рекомендации о применении технологии восстановления ЭКНП для ремонта некоторых деталей следующих предприятий: ОАО «КТЗ», ПАО «КАДВИ», ГП «Калужская МТС», НПП «35 механический завод», АО «ДСП», ООО «ТЕПЛОВОЗ», ООО «ВЭРЗ», ООО «ЭЛМАТ», 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 «Технологии сварки и диагностики» 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 «Технологии сварки и диагностики» КФ МГТУ им. Баумана (г. Калуга, 2017 г.) и на научном семинаре кафедры «Сварка и диагностика» 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 144 наименований и 3 приложений. Общий объем работы составляет 235с., в которой представлены 67 рисунков и 12 таблиц.

2. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во 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 изделий типа «втулка» и рассмотрены различные возможные технологии их ремонта. При восстановлении наружных поверхностей таких изделий в цилиндрических деталях могут появиться остаточные перемещения размеров. Основное количество работ по изменению размеров в деталях типа «втулка» при их изготовлении или ремонте было выполнено для дуговой сварки и наплавки.

Возможные перемещения размеров в изделиях, при дуговой сварке или наплавке, рассмотрены в работах Николаева Г.А., Куркина С.А., Винокурова В.А., Рыкалина Н.Н., Сагалева В.М., Стеклова О.И., Григорьянца А.Г., Окерблома Н.О., Махненко В.И., Навроцкого Д. И. и многих других ученых.

В немногочисленных работах по ЭКНП деталей типа «втулка» установлено, что остаточные перемещения размеров после наварки существенно меньше, чем при дуговой наплавке, что подтверждают и наши собственные исследования.

Экспериментально установлено, что, как правило, после ЭКНП деталей типа «втулка» в них могут появиться остаточные осевые и поперечные перемещения размеров. При этом наиболее важно знать, как изменяются именно остаточные радиальные изменения размеров в таких деталях, так как в отличие от осевых перемещений, они наиболее часто выходят из своего поля допуска.

Поэтому в предлагаемой работе рассмотрены наиболее часто встречающиеся остаточные поперечные изменения размеров в изделиях типа «втулка», которые могут появиться после ЭКНП, а также определены основные факторы, влияющие на них. Проведенные предварительные исследования позволили установить следующие основные факторы – наружные диаметры D и толщины S деталей типа «втулка», режимы наварки (изменяли только ток I_n), предел текучести σ_t основного металла изделия и количество наваренных слоев C .

Особенно важно прогнозировать, как изменяются количественные значения остаточных радиальных перемещений размеров в деталях типа «втулка» в зависимости от различных основных факторов до выполнения технологии ЭКНП. Такой подход позволит предупреждать случаи появления окончательного или исправимого брака в изделиях типа «втулка».

На основании выше сказанного была поставлена цель и задачи диссертационной работы.

Во второй главе для деталей типа «втулка», которые работают на трение скольжения или качения, приведены результаты экспериментальных исследований формирования покрытий в цилиндрических образцах с различными наружными диаметрами $50\text{мм} \leq D \leq 100\text{мм}$ на режимах наварки с

осадкой $40\% \leq \varepsilon \leq 85\%$ (ток изменялся $6\text{кА} \leq I_n \leq 12\text{кА}$) одной и двумя проволоками Нп-65Г диаметром 2 мм. При этом во всех случаях, усилие сжатия электродов составляло $P=1,5\text{кН}$, а время импульса и паузы соответственно равнялось – $t_{\text{и}}=0,1\text{с}$ и $t_{\text{п}}=0,2\text{с}$. Число оборотов (скорость наварки) n образцов рассчитывали по формуле $n=85/D$.

В качестве основного параметра, комплексно представляющего режимы ЭКНП и определяющего технологические свойства наваренного металла, была выбрана осадка проволоки ε . Предлагаемый параметр не зависит от размеров деталей типа «втулка» D и S , легко измеряется в процессе наварки и информативен во всем диапазоне изменения режимов ЭКНП.

Были подобраны режимы ЭКН (осадки ε) проволоки Нп-65Г диаметром 2 мм, нанесение покрытий на которых позволяет получить заданные технологические свойства наваренного металла восстанавливаемых наружных поверхностей изделий, работающих на трение скольжения или качения.

Для наружных поверхностей таких изделий, в зависимости от материалов сопрягаемых пар поверхностей, наличия или отсутствия смазки и ответственности ремонтируемых изделий предложены следующие интервалы изменения осадки ε (режимов наварки) при ЭКН одной и двумя проволоками:

- для менее нагруженных изделий и/или работающих с принудительной жидкой смазкой:

$$\begin{aligned} 55\% \pm 2\% \leq \varepsilon \leq 80\% \pm 2\%, & \text{ (одна проволока)} \\ 60\% \pm 2\% \leq \varepsilon \leq 80\% \pm 2\%, & \text{ (две проволоки)} \end{aligned} \quad (2)$$

- для более нагруженных изделий и/или работающих без жидкой смазки:

$$65\% \pm 2\% \leq \varepsilon \leq 80\% \pm 2\%, \text{ (одна и две проволоки)} \quad (3)$$

Твердость наружного покрытия образцов, наваренного проволокой Нп-65Г диаметром 2 мм, составляет не меньше 50 HRC во всех приведенных интервалах изменения осадки проволоки ε .

Также, в указанных интервалах, обеспечено образование сплошного слоя наваренного металла наружных поверхностей образцов после ЭКН проволоки Нп-65Г и достаточная прочность сцепления $\sigma_{\text{сц}}$ с основным металлом при отсутствии дефектов в виде пор, трещин и раковин.

Методика выбора режимов наварки (осадки проволоки ε) конкретных изделий в приведенных интервалах (2,3) при ЭКН одной или двумя проволоками Нп-65Г одинакова как для наружных поверхностей цилиндрических деталей типа «втулка», так и «вал» (Рисунок 2 а, б),

Для устранения конкретного износа наружных поверхностей восстанавливаемых цилиндрических изделий осадка ε (режим наварки) определяется при наименьшем количестве слоев S необходимых для ЭКН одной или двумя проволоками.

Однако при ЭКН проволоки Нп-65Г наружных поверхностей в деталях типа «втулка», в отличие от изделий типа «вал», на выбранных режимах наварки, могут появиться остаточные радиальные перемещения размеров, которые необходимо учитывать до выполнения технологии ЭКНП.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований остаточных радиальных изменений размеров в образцах типа «втулка» при различных значениях осадки ε проволоки Нп-65Г после ЭКНП и на тех же режимах ЭКПО в один и несколько слоев C (проходов i) для различных основных факторов.

Влияние осадки проволоки ε (режимов наварки) на изменения остаточных радиальных перемещений размеров в изделиях, исследовали на образцах типа «втулка» (Рисунок 1,а), диаметром D и длиной L равными 75 мм и толщиной стенки $S=6$ мм, которые были наварены проволокой Нп-65Г диаметром 2,0 мм. Результаты исследований, представлены на Рисунке 3 – Рисунке 4, из которых хорошо видно, что с ростом осадки проволоки ε (изменение тока наварки I_n) увеличиваются остаточные радиальные перемещения размеров в образцах типа «втулка».

В предлагаемой работе также изучали влияние варьирования толщины стенки образца S , на изменение остаточных радиальных перемещений размеров (Рисунок 3).

Наружный диаметр D и длина L всех образцов были равны 75 мм, а толщина стенки S варьировалась и составляла 4 мм, 6 мм и 8 мм.

Было установлено, что наибольшие остаточные радиальные перемещения размеров получены после ЭКНП образцов с толщиной стенки 4мм (Рисунок 3). При этом установленная закономерность соблюдается при различных значениях осадки проволоки в интервале $50\% \leq \varepsilon \leq 80\%$.

При одинаковой толщине стенки $S=6$ мм наибольшие внутренние остаточные радиальные изменения размеров получены при ЭКН образцов типа «втулка» диаметром $D=100$ мм, а наименьшие для $D=50$ мм (Рисунок 5). Установленная закономерность наблюдается приблизительно до $S \leq 11,5$ мм, а затем, из-за различных углов наклона аппроксимирующих прямых, при $S > 11,5$ мм остаточные перемещения больше для $D=50$ мм, чем для $D=100$ мм.

При постоянных значениях осадки проволоки ε от слоя к слою, наибольшие внутренние остаточные радиальные изменения размеров в деталях типа «втулка» получены при ЭКН первых слоев для образцов с различными наружными диаметрами D и толщинами стенок S которые составляют, примерно, 50%.

Установлено, что при постоянной осадке ε , с увеличением количества наваренных слоев C от одного до пяти, темп роста остаточных поперечных перемещений размеров в образцах типа «втулка» снижается, а поперечные изменения соответственно увеличиваются приблизительно на 50%, 25%, 15%, 8% и 2%, а затем их рост прекращается.

Указанное процентное соотношение вызвано постепенным увеличением площади сечения образца типа «втулка» и снижением зоны термического влияния (ЗТВ) в основном металле.

Для количества наваренных слоев C от одного до пяти при постоянной осадке проволоки ε зависимость остаточных радиальных перемещений размеров в образцах типа «втулка» хорошо описывается полиномом второго

порядка с коэффициентом корреляции 0,99. Для наиболее часто встречаемых случаев технологии ЭКНП с количеством наваренных слоев не более трех, вполне подходит аппроксимация полиномом первого порядка. В этом случае коэффициент корреляции равен 0,96, а аппроксимирующие прямые имеют разные тангенсы угла наклона к оси абсцисс при переходе от $D=50\text{мм}$ к наружным диаметрам $D=75\text{мм}$ и $D=100\text{мм}$.

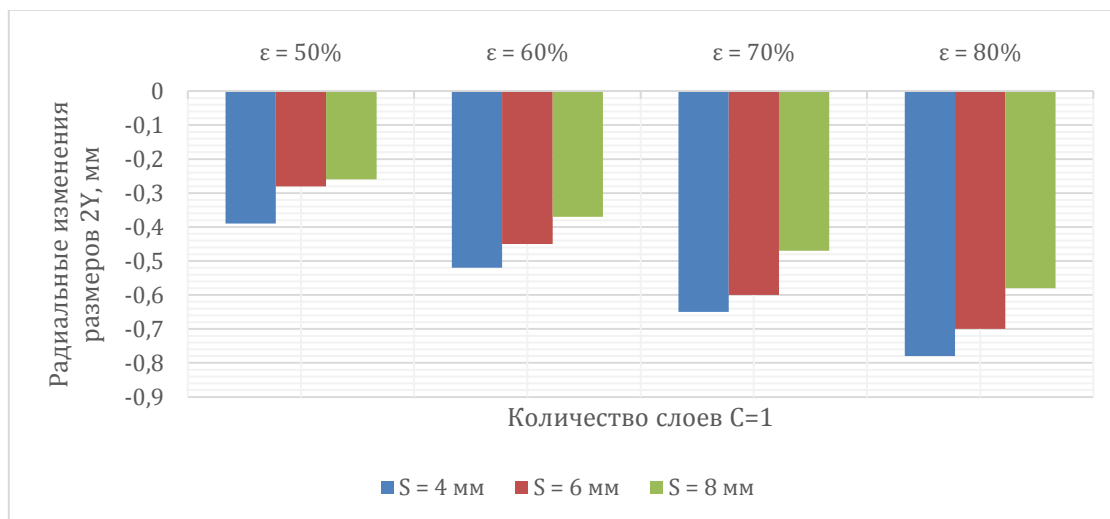


Рисунок 3. Остаточные радиальные изменения размеров в образцах типа «втулка» из стали 45 с наружным диаметром $D=75\text{ мм}$ и различными толщинами стенки $S=4-8\text{мм}$ после ЭКН одного слоя C проволокой Нп-65Г диаметром 2 мм и при различных значениях осадки ϵ в интервале $50\% \leq \epsilon \leq 80\%$.

Также были проведены экспериментальные исследования по изучению, влияния изменения твердости основного металла образца типа «втулка» из стали 45 на варьирование его предела текучести σ_t , а, затем, влияние этого фактора на изменения остаточных радиальных перемещений размеров в таких изделиях.

Было установлено, что при изменении осадки в интервалах $50\% \leq \epsilon \leq 65\%$ и $55\% \leq \epsilon \leq 65\%$ соответственно при ЭКН одной или двумя проволоками в твердой фазе в один – три слоя C без оплавления соединяемых металлов, поперечные перемещения размеров незначительно зависят от варьирования предела текучести σ_t основного металла. Остаточные радиальные изменения размеров в образцах типа «втулка» изменяются в указанном диапазоне осадок ϵ примерно на 0,05мм.

При изменении осадки одной или двух проволок в интервале $65\% < \epsilon \leq 80\%$, влияние предела текучести σ_t основного металла в рассматриваемом интервале, на изменение остаточных поперечных перемещений размеров, несколько больше и составляет не более 0,3 мм при ЭКН с оплавлением соединяемых металлов в один – три слоя C .

По результатам проведенных исследований, была выполнена обработка экспериментальных данных методом планирования эксперимента, которая позволила получить зависимости остаточных радиальных изменений размеров

от наиболее значимых факторов, а именно: наружного диаметра D образца типа «втулка» и его толщины стенки S , а также осадки проволоки ϵ для 1-3 наваренных слоев C .

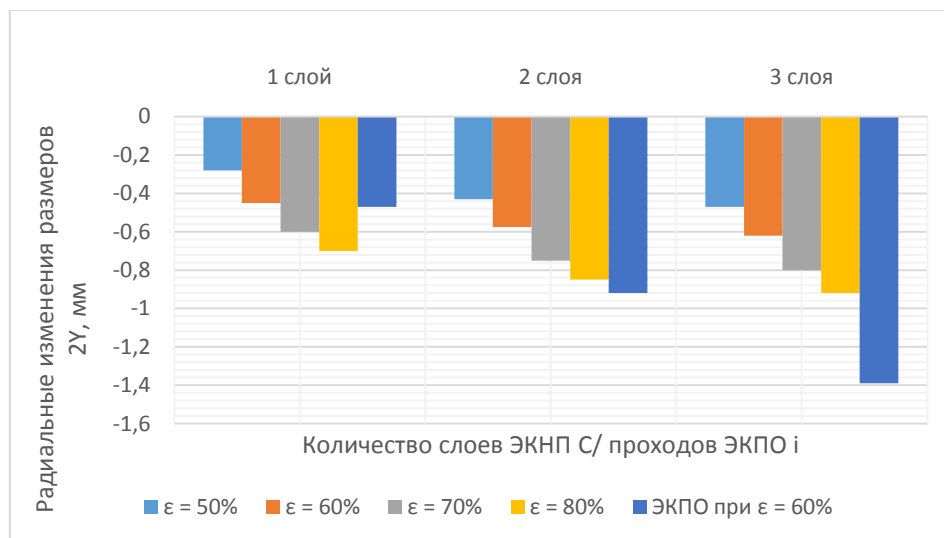


Рисунок 4. Остаточные радиальные изменения размеров в образцах типа «втулка» из стали 45 с наружным диаметром $D=75$ мм и толщиной стенки $S=6$ мм. ЭКН проволоки Нп-65Г диаметром 2,0 мм в 1 – 3 слоя C с постоянной осадкой ϵ для всех слоев C на одном режиме. ЭКПО в 1 -3 прохода i на одном режиме равно ЭКНП с осадкой $\epsilon=60\%$.

Формулы (4-6) для расчета остаточных радиальных перемещений размеров в деталях типа «втулка» после ЭКН проволоки Нп-65Г диаметром 2мм приведены ниже и получены для предела текучести B_t основного металла из стали 45 в состоянии поставки равно 530 МПа.

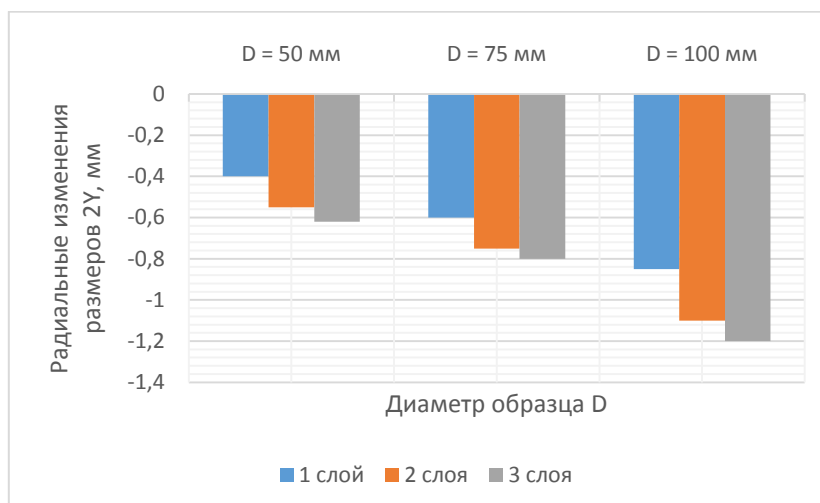


Рисунок 5. Остаточные радиальные изменения размеров в образцах типа «втулка» из стали 45 с наружными диаметрами $D=50-100$ мм и толщиной стенки $S=6$ мм после ЭКН в 1 – 3 слоя проволокой Нп-65Г диаметром 2 мм с постоянной осадкой $\epsilon=70\%$ ($\pm 2\%$) для всех слоев C .

Для 1 слоя:

$$2Y = -0,603635 + 0,009293D + 0,04404125S + 0,9309\varepsilon - 0,001175 \cdot SD - 0,051025 \cdot S\varepsilon + 0,00442 \cdot D\varepsilon \quad (4)$$

Для 2 слоев:

$$2Y = -1.31955 + 0.0199D + 0.0896S + 1.671\varepsilon - 0.0019DS - 0.075\varepsilon S \quad (5)$$

Для 3 слоев:

$$2Y = -0.1625725 + 0.0025342D - 0.048421S + 0.18345\varepsilon - 0.000046DS + 0.118725\varepsilon S + 0.029332D\varepsilon - 0.003083D\varepsilon S \quad (6)$$

Во многих случаях при восстановлении изделий типа «втулка» целесообразно применять технологию ЭКПО, которая выполняется на том же оборудовании по двухзаходной схеме (Рисунок 1), что и ЭКНП, но без подачи присадочных проволок под электроды. Этот способ используется для дополнительной осадки радиальных размеров в таких деталях, с целью увеличения припусков на последующую механическую обработку изделий. Установлено, что при постоянных режимах ЭКПО зависимость остаточных радиальных перемещений размеров в образцах типа «втулка» от количества проходов i хорошо описывается полиномом первого порядка.

На основании моделирования в среде ANSYS установлена и экспериментально подтверждена линейная зависимость радиальных изменений размеров от количества проходов i при ЭКПО.

Последовательное выполнение операций ЭКПО + ЭКНП предложено называть как комбинированная технология. Наиболее целесообразно вначале выполнить технологию ЭКПО, а затем ЭКНП. В предлагаемой работе установлены зависимости и приведены сравнения остаточных радиальных перемещений размеров в образцах типа «втулка» соответственно после ЭКНП и ЭКПО при варьировании количества слоев S и проходов i от одного до трех. Установлено, что, если использовать постоянные и одинаковые режимы при ЭКПО и ЭКНП одного-трех проходов i или слоев S , то остаточные радиальные перемещения размеров при осадке соответственно превышают аналогичные поперечные изменения при наварке образцов типа «втулка» приблизительно на 5%, 30% и 85% (Рисунок 4). То есть, приемлемые прогнозируемые остаточные радиальные перемещения размеров по схеме ЭКПО были получены только для наварки одного слоя металла S , что явно недостаточно, так как на практике применяется ЭКНП в 1-3 слоя.

В четвертой главе рассмотрены основные положения методики восстановления электроконтактной наварки проволоки Нп-65Г наружных поверхностей в цилиндрических деталях типа «втулка», на основании прогнозирования остаточных поперечных перемещений размеров от ЭКНП.

Приведены пять различных схем восстановления деталей типа «втулка».

На основании определения количественных значений остаточных радиальных перемещений размеров по формулам (4-6) или таблицам (составленным на их основании) выбирается одна из пяти возможных технологий восстановления наружных поверхностей в цилиндрических деталях типа «втулка» при $\sigma_T = 530$ МПа.

Если прогнозируется, что при осадке ε (режиме наварки) установленной из расчета минимального количества наваренных слоев S , внутренних остаточных радиальных перемещений ожидать не следует, то необходимо применить первую технологическую схему ремонта деталей типа «втулка». Наружные цилиндрические поверхности в таких изделиях следует наваривать, не обращая внимания на наличие внутренних отверстий, то есть, по схеме ЭКНП изделий типа «вал».

Технологии ремонта со второй по пятую могут рассматриваться только в случае ожидания обязательного появления остаточных поперечных перемещений размеров.

Если прогнозируется, что остаточные радиальные изменения размеров не превысят полей допусков на внутренний диаметр восстанавливаемых деталей, то такие изделия следует наваривать, не обращая внимания на наличие внутренних отверстий, то есть, по схеме ЭКНП деталей типа «вал». Такой вариант восстановления деталей типа «втулка» является второй технологической схемой ремонта, которая отличается от первой технологии восстановления необходимостью сравнения прогнозируемых остаточных радиальных перемещений размеров с их полями допусков.

Технологии ремонта с третьей по пятую могут рассматриваться только при условии, если прогнозируемые внутренние остаточные радиальные перемещения размеров в деталях типа «втулка» ожидаются не входящими в их поля допусков.

Если прогнозируемые остаточные радиальные перемещения размеров после ЭКНП наружных поверхностей ожидаются не меньше установленного минимального припуска 0,8-1,0мм, то такие детали типа «втулка» следует восстанавливать по третьей схеме ремонта, наваривая аналогично изделиям типа «вал», но с обязательной последующей механической обработкой внутренних отверстий.

Четвертую и пятую технологии восстановления деталей типа «втулка» необходимо использовать, если прогноз величины остаточных поперечных перемещения размеров составляет меньше 0,8-1,0мм на диаметр. Принципиальное различие этих технологических схем ремонта заключается в том, что по четвертой технологии исключается появление, а по пятой, наоборот, разрешается дальнейшее увеличение ожидаемых остаточных радиальных перемещений размеров.

Четвертая технологическая схема восстановления деталей типа «втулка» предполагает использование оснастки (распоров) в виде применения ответных изделий или изготовления новых, с целью исключения возможных небольших остаточных радиальных перемещений размеров. При возможности использования ответных деталей применяется всегда четвертая технологическая схема ремонта изделий типа «втулка».

При пятой технологической схеме восстановления наружных поверхностей в деталях типа «втулка» предполагается использование

комбинированной технологии, включающей в себя операции ЭКПО, а затем ЭКНП.

Выбирать между четвертой (при изготовлении новых распоров) и пятой технологическими схемами ремонта изделий типа «втулка» необходимо на основании сравнительного анализа затрат на их выполнение.

Учет влияния предела текучести σ_T основного металла осуществляется прибавлением к остаточным радиальным изменениям размеров, определенным по формулам (4-6), остаточных поперечных перемещений размеров, учитывающих различие пределов текучести, если $\sigma_T \leq 530$ МПа и вычитанием, если $\sigma_T > 530$ МПа.

Влияния предела текучести σ_T основного металла образца типа «втулка» из стали 45 на изменение остаточных радиальных перемещений размеров при ЭКН в один слой с осадкой $\varepsilon=60\%$ представлено на Рисунке 6.

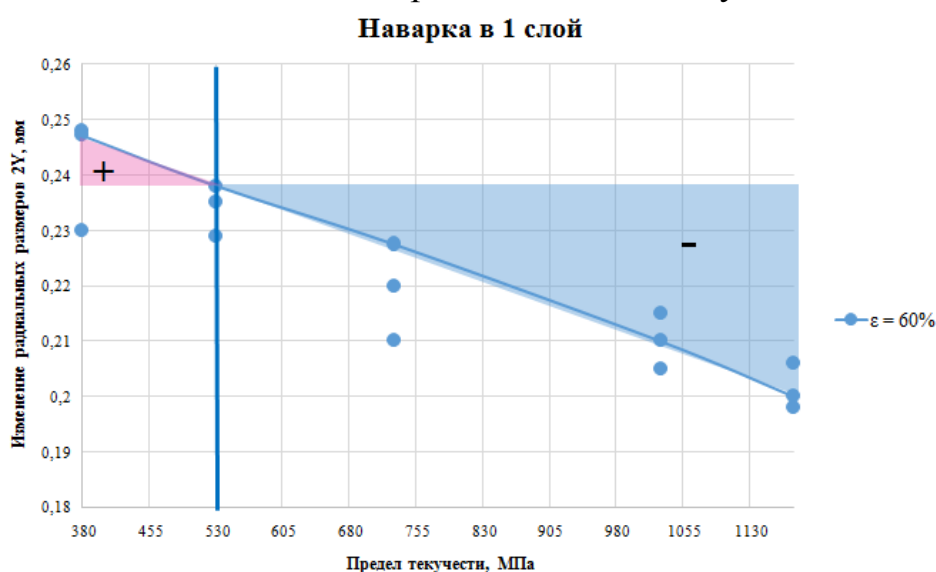


Рисунок 6. Зависимость остаточных радиальных перемещений размеров в деталях типа «втулка» от предела текучести σ_T основного металла изделия при ЭКНП с осадкой $\varepsilon=60\%$ в 1 слой.

В этой главе определены также толщины S , начиная с которых отсутствуют остаточные радиальные изменения размеров в образцах типа «втулка» после ЭКН проволоки Нп-65Г диаметром 2мм в один-три слоя с наружных поверхностей в изделиях диаметром $D=50$ мм, 75мм и 100мм из стали 45 с пределом текучести 530МПа.

Установленные толщины S были проверены и подтверждены при восстановлении реальных изношенных цилиндрических деталей типа «втулка».

В пятой главе представлена методика восстановления ЭКН проволоки Нп-65Г диаметром 2мм (примеры ее использования приведены в приложении П.4 диссертации) наружных поверхностей в различных цилиндрических деталях типа «втулка», которая состоит из следующих основных этапов:

1. Прогнозирование условий работы изделий в эксплуатации, определение предела текучести σ_T основного металла восстанавливаемого изделия, выбор одного из двух интервалов (1-2) изменения осадки ε (режима наварки).

2. Определение режимов наварки одной или двумя проволоками (осадки ε_1 или ε_2) и выбирается один из них из условия устранения износа наружных поверхностей изделий за наименьшее количество наваренных слоев С.
3. Оценка возможности появления остаточных радиальных изменений размеров в деталях типа «втулка» (с размерами D и S) после ЭКН проволоки Нп-65Г на выбранном режиме наварки (осадки ε) и пределе текучести основного металла детали $\sigma_T=530\text{МПа}$, должна выполняться по формулам 4-6 или таблицам 1-9 приложения 2 диссертации.
4. Пересчет остаточных радиальных перемещений размеров с предела текучести $\sigma_T=530\text{МПа}$ на фактическое значение, определенное в пункте 1 по данным на Рисунках 1-9 приложения П.3 диссертации.
5. Выбор одной из пяти технологических схем восстановления каждой конкретной детали типа «втулка» по результатам пунктов 1 - 4.

В заключение пятой главы представлены фотографии успешно восстановленных по предлагаемой методике деталей типа «втулка».

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Показана целесообразность и практическая возможность прогнозирования количественных значений остаточных радиальных перемещений в различных цилиндрических деталях типа «втулка», с целью предупреждения случаев появления окончательного или исправимого брака и применения для этого, на основании сделанной оценки, одного из пяти возможных способов восстановления таких изделий.

2. Установлены интервалы изменения осадки (режимов наварки) для ЭКН одной и двумя проволоками Нп-65Г диаметром 2мм наружных поверхностей, различно нагруженных в эксплуатации двух групп изделий типа «втулка», а затем в определенных диапазонах варьирования режимов ЭКНП исследованы технологические свойства наваренного металла образцов.

3. Установлена и экспериментально подтверждена закономерность изменения долей остаточных поперечных перемещений от максимально возможного суммарного радиального изменения размеров, соответственно составляющих 50%, 25%, 15%, 8% и 2%, после ЭКН проволоки Нп-65Г первого - пятого слоев, вызванная постепенным увеличением площади поперечного сечения образца типа «втулка» и уменьшением размеров ЗТВ в основном металле.

4. Установлено и экспериментально доказано, что при применении одинаковых режимов осадки и наварки остаточные радиальные перемещения размеров при ЭКПО превышают аналогичные перемещения размеров при ЭКНП для одного-трех слоев приблизительно на 5%, 30% и 85%.

5. Использование результатов диссертационной работы в ООО «НПП «Велд» позволило получить экономический эффект 650000 рублей за счет снижения затрат на исправление брака, а также необоснованного изготовления технологической оснастки.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В РАБОТАХ:

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.