

АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание степени доктора философии (PhD) по направлению подготовки 8D071 - «Инженерия и инженерное дело», по образовательной программе 8D07101 - «Машиностроение».

МУХИТОВОЙ АДЕЛИИ ЕРЖАНОВНЫ

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ВАЛОВ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ИХ ВОССТАНОВЛЕНИИ

Актуальность диссертационной работы. Диссертация выполнена на соискание степени доктора философии PhD по направлению подготовки 8D071 - «Инженерия и инженерное дело», по образовательной программе 8D07101 - «Машиностроение».

В современных условиях индустриального развития Республики Казахстан, характеризующихся курсом на модернизацию промышленности и ресурсосбережение, проблема восстановления работоспособности ответственных деталей машин приобретает стратегическое значение. В машиностроении и энергетике электродвигатели являются основными силовыми агрегатами, преобразующими электрическую энергию в механическую. Стабильность работы промышленного оборудования во многом зависит от надежности их ключевых компонентов, среди которых центральное место занимает вал.

Вал электродвигателя - это ответственная деталь, передающая крутящий момент и воспринимающая сложные циклические нагрузки: кручение, изгиб и вибрации. Валы электродвигателей, являясь наиболее нагруженными элементами электроприводов, определяют межремонтный цикл и общую надежность производственных линий. Статистический анализ показывает, что основной причиной выхода из строя восстановленных валов является недостаток материала в зоне износа, а качественное изменение физико-механических свойств металла в зоне термического влияния и наплавленном слое.

Анализ эксплуатации показывает, что валы работают в условиях повышенного износа и усталостного накопления повреждений, особенно в зонах концентраторов напряжений - шпоночных пазах, галтелях и посадочных местах под подшипники. В промышленном регионе, таком как Карагандинская область, объем ежегодно восстанавливаемых валов только на крупных ремонтных предприятиях составляет в среднем около 200 единиц. Это подтверждает массовый характер проблемы и высокую потребность в эффективных технологиях ремонта.

Восстановление валов наплавкой является наиболее рациональным методом с точки зрения ресурсосбережения. Экономический анализ

демонстрирует, что стоимость восстановленного вала почти на 75% ниже стоимости новой детали. Однако, несмотря на экономическую выгоду, существует серьезная техническая проблема - долговечность восстановленных валов в среднем в два раза ниже, чем у новых изделий. Это связано с возникновением значительных остаточных напряжений и структурной неоднородностью материала после наплавки.

На сегодняшний день существуют большое количество исследований по восстановлению валов, однако стратегически важной является проблема обеспечения качества восстановленной поверхности и долговечности восстановленных валов. В связи с тем, что Казахстан стремится к ресурсосбережению и обеспечению надежности ремонтных технологий вопрос совершенствования методов технологического обеспечения качества валов электродвигателей при их восстановлении является **актуальным**.

Гипотезой исследования является предположение о возможной связи и закономерности между технологическими параметрами процессов наплавки и термообработки с основными показателями качества нанесенного слоя при восстановлении валов электродвигателей, управление которыми позволит существенно повысить усталостную долговечность восстановленных валов.

Цель работы: увеличение долговечности восстанавливаемых валов электродвигателей за счет совершенствования методов технологического обеспечения качества.

Для достижения цели решены следующие **задачи**:

1. изучено состояние проблем обеспечения качества восстанавливаемых валов электродвигателей и анализ существующих технологии их восстановления;
2. экспериментально исследована твердость, износостойкость и остаточные напряжения наплавленного слоя на различных режимах наплавки и термообработки с применением различных легирующих наплавочных материалов;
3. смоделирована долговечность вала после наплавки и термообработки;
4. разработано устройство для центрирования валов электродвигателей после наплавки;
5. оценена технико-экономическая эффективность предлагаемой технологии и разработанного устройства.

Методы исследования.

В работе применен комплексный подход, сочетающий:

1. использование планов многофакторного эксперимента для определения влияния технологических режимов на твердость наплавленного слоя. Измерение твердости методом Виккерса и проведение металлографических исследований микроструктуры;
2. использование математического моделирования для построения уравнений регрессии (линейных, квадратичных, кубических) для описания

свойств наплавленного слоя и их оптимизация через поиск экстремумов функций;

3. компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния и расчет циклической долговечности (S-N метод) в программных комплексах ANSYS Workbench и nCode DesignLife с применением метода конечных элементов;

4. конструкторское проектирование при разработке схем базирования и 3D-визуализация приспособлений в среде Autodesk Inventor.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Получены зависимости твердости наплавленного слоя для специализированных наплавочных материалов (Св08Г2С, 30ХГСА, ОК Tubrodur 35 G M) от скорости подачи проволоки;

2. Получены зависимости остаточных напряжений под воздействием индукционного нагрева от скорости перемещения индуктора и частоты источника питания;

3. Смоделировано напряженно-деформированное состояние вала после наплавки и термообработки в программе ANSYS с оценкой его циклической долговечности;

4. Разработана научная база для автоматического центрирования деталей по фактической геометрической оси с использованием системы самоустанавливающихся скоб и роликовых опор, минимизирующая погрешности базирования.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. технология восстановления валов электродвигателей наплавкой;

2. результаты экспериментального исследования оценки твердости и износостойкости, однородности микроструктуры и исследования остаточных напряжений в наплавленном слое;

3. уравнение для оценки твердости наплавленной поверхности;

4. уравнение для оценки остаточных напряжений в наплавленном слое;

5. моделирование усталостной долговечности в программе ANSYS;

6. техническое задание по разработке универсального самоцентрирующегося приспособления с самоустанавливающимися скобами для центрирования вала.

Автор защищает:

1. Результаты экспериментального исследования оценки твердости, износостойкости наплавленного слоя и остаточных напряжений после термообработки.

2. Уравнение для оценки твердости наплавленной поверхности.

3. Уравнение для оценки остаточных напряжений поверхности после наплавки и термообработки.

4. Результаты моделирования долговечности вала после наплавки и термообработки с использованием программного комплекса Ansys.

5. Техническое задание по разработке новой конструкции для центрирования вала после наплавки.

Объект исследования: процессы наплавки, термообработки и центрирования валов электродвигателей.

Предмет исследования: взаимосвязи и закономерности между технологическими параметрами наплавки и термообработки с основными количественными показателями качества восстановленного слоя.

Практическая значимость работы заключается в:

1. методике инженерного расчета долговечности валов в программе ANSYS, позволяющей прогнозировать ресурс детали на этапе проектирования технологии ремонта;

2. разработке устройства для центрирования вала после наплавки, обеспечивающая необходимую точность обработки даже при отсутствии штатных центровых отверстий;

3. в установлении оптимальных режимов наплавки и термообработки при восстановлении валов для ремонтных предприятий, позволяющих снизить себестоимость работ на 75% при одновременном повышении качества поверхностного слоя.

Результаты исследования и внедрены в производство ТОО «KAZTECHPRO» (г. Караганда).

Краткое содержание.

В первой главе выполнен анализ состояния проблемы исследования, определены основные дефекты валов электродвигателей, которые восстанавливаются наплавкой. Сделан обзор существующих способов восстановления валов электродвигателей наплавкой.

Во второй главе методика и результаты экспериментальных исследований полуавтоматического способа и режимов наплавки валов электродвигателей. Исследованы твердость и износостойкость, однородность микроструктуры наплавленного слоя, также исследование сниженных остаточных напряжений в наплавленном слое при правильно подобранной термообработке. Разработана математическая модель зависимости твердости наплавленного слоя от технологических режимов наплавки (скорость подачи проволоки). Разработана математическая модель зависимости остаточных напряжений от технологических параметров термообработки (частота источника питания).

В третьей главе проведено имитационное моделирование циклической долговечности восстановленного вала после наплавки и после термообработки. С использованием программного комплекса ANSYS проведен анализ распределения остаточных напряжений и деформаций в восстановленной детали. На основе моделирования выполнена оценка циклической долговечности восстановленного вала и определены рациональные режимы, обеспечивающие увеличение долговечности восстановленного вала на 30%.

В четвертой главе разработано универсальное самоцентрирующееся приспособление для центрирования восстановленных валов после наплавки. Выполнено проектирование конструкции приспособления и его трехмерная визуализация в программе Autodesk Inventor. Разработан механизм автоматического центрирования детали по фактической геометрической оси независимо от степени износа и особенностей наплавленного слоя. Проведен расчет элементов конструкции и анализ работоспособности разработанного устройства. Установлено, что применение приспособления позволяет повысить точность базирования вала и сократить трудоемкость операций механической обработки после восстановления.

В пятой главе произведена технико-экономическая оценка разработанной технологии восстановления валов электродвигателей. Рассчитаны затраты на восстановление вала, определена себестоимость восстановленного вала и выполнено сравнение с затратами на приобретение новой детали. Проведен расчет экономического эффекта и срока окупаемости внедрения разработанных технологических решений. Разработаны практические рекомендации по применению рациональных режимов наплавки и индукционной термообработки, а также рекомендации по использованию самоцентрирующегося приспособления в условиях ремонтных предприятий. Полученные результаты подтверждают эффективность предложенной технологии восстановления валов электродвигателей и возможность ее внедрения в производственную практику.

Разработаны рекомендации по выбору режимов наплавки и индукционной термообработки ТВЧ восстановленных валов электродвигателей, методике оценки их долговечности и применению самоцентрирующегося приспособления для обеспечения точности механической обработки после восстановления.

Личный вклад диссертанта. Работа выполнена автором лично, автор выполнил патентный анализ известных приспособлений для центрирования валов, обзор теоретических исследований в области теории сварочных процессов и ремонта машин, технологии наплавки с приданием заданных механических свойств, а также особенностями последующей обработки. Поставлена задача и разработана методика исследования, сконструирована и смоделирована универсальное самоцентрирующее приспособление для центрирования валов электродвигателей, определены оптимальные технологические режимы наплавки и термообработки проведены экспериментальные исследования по определению твердости и износостойкости, однородности микроструктуры и сниженные остаточные напряжения наплавленного слоя.

Публикация и апробация работы. Основные положения диссертации

опубликованы в 10 научных работах на русском и казахском языках, в том числе: 1 статья в журнале базы Scopus с процентилем не менее 25 (Journal of Applied Engineering Science (43%), 3 статьи в изданиях, рекомендованных Комитетом по обеспечению качества в сфере образования и науки РК. Результаты исследований докладывались и обсуждались на международных научных конференциях: Международно – практическая конференция «XVI Сагиновские чтения. Интеграция образования, науки и производства», 13-14 июня 2024 г, Международно – практическая конференция «XVII Сагиновские чтения. Интеграция образования, науки и производства», 26-27 июня 2025 г, Международно – практическая конференция НАО «Казахский агротехнический университет им. С. Сейфуллина» «Развитие машиностроительной отрасли и подготовка высококвалифицированных кадров новой формации» 30-31 мая 2025г. Получен 1 патент РК на полезную модель и 2 свидетельства о государственной регистрации прав на объект авторского права. Во всех публикациях представлены материалы и результаты теоретических и экспериментальных исследований процессов восстановления валов электродвигателей.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа изложена на 168 страницах машинописного текста, состоит из введения, 5 разделов и заключения, включает 79 рисунков, 32 таблиц, список использованных источников из 90 наименований и 7 приложений.

Результаты исследования и основные выводы.

В диссертации представлены новые научно-обоснованные теоретические и экспериментальные выводы, имеющие ключевое значение для совершенствования методов технологического обеспечения качества валов электродвигателей при их восстановлении.

В ходе выполнения диссертационного исследования была решена важная научно-техническая задача, направленная на повышение долговечности восстановленных валов электродвигателей, и получены следующие выводы:

1. В результате исследования подтверждена гипотеза о взаимосвязи между технологическими факторами восстановления наплавки и термообработки и физико-механическими свойствами поверхностного слоя, что позволяет целенаправленно формировать эксплуатационные характеристики валов, увеличивая их долговечность;

2. Получены эмпирические уравнения регрессии по определению твердости наплавленного слоя от скорости подачи проволоки для материалов Св08Г2С, 30ХГСА и ОК Tubrodur 35 G M:

- Св08Г2С: $y = -45,1232x^3 + 400,2165x^2 - 1099,2045x + 1147,4487$;

- ОК Tubrodur 35GM: $y = 33,8424x^3 - 311,0147x^2 + 1000,4974x - 707,5193$;

- 30ХГСА: $y = -11,4747x^3 + 87,7887x^2 - 152,4326x + 314,0658$.

3. Установлены оптимальные режимы наплавки, обеспечивающие требуемые значения твердости Св08Г2С – 180 – 220 HV; ОК Tubrodur 35 G M – 320 – 400 HV; 30ХГСА – 280 – 360 HV:

- $V = 2,75$ м/мин, $I = 128$ А, $U = 20,4$ В (проволока СВ08Г2С);

- $V = 3,0$ м/мин, $I = 9$ А, $U = 19,5$ В (проволока ОК Tubrodur 35GM);

- $V = 2,75$ м/мин, $I = 96$ А, $U = 19,5$ В (проволока 30ХГСА);

4. Установлено, что проволока ОК Tubrodur 35GM является наиболее эффективным материалом среди испытанных легированных проволок, т.к. обладает мелкодисперсной игольчатой структурой и минимальным коэффициентом трения ($f = 0,44$);

5. Выявлено влияние параметров индукционного нагрева (ТВЧ) на уровень остаточных напряжений. Определены оптимальные режимы термообработки (скорость перемещения индуктора $V = 5-6$ м/с при частоте тока $f = 60$ кГц) обеспечивающие минимальные осевые деформации и остаточные напряжения;

6. С помощью программного комплекса ANSYS и nCode DesignLife проведено имитационное моделирование напряженно-деформированного состояния вала после наплавки и термообработки;

7. Доказано, что применение термообработки ТВЧ после наплавки снижает максимальные эквивалентные напряжения более чем в 2 раза. Усталостная долговечность при этом увеличивается с 12 238 до 15 777 циклов;

8. Сконструировано самоцентрирующееся устройство, позволяющее в автоматическом режиме идентифицировать и фиксировать геометрическую ось восстанавливаемого вала. Это техническое решение исключает погрешности, связанные с поиском центральной оси детали после проведения ремонтных операций;

9. Внедрение предложенной технологии наплавки и термообработки обеспечивает годовой доход более 15 млн тенге при программе восстановления 200 валов в год. Срок окупаемости технологического процесса составляет 0,34 года;

10. Разработаны рекомендации по наплавке и термообработки наплавленных валов электродвигателей, а также техническое задание для изготовления универсального самоцентрирующего приспособления с самоустанавливающимися скобами для центрирования вала;

11. Результаты исследований внедрены в производственный процесс ТОО «HANSA-FLEX Гидравлик Алматы» и ТОО «Qaztechpro».

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает глубокую признательность и благодарность научному консультанту к.т.н., профессору кафедры «Технологическое оборудование,

машиностроение и стандартизация» Жаркевич О.М., за помощь на всех этапах выполнения диссертации, ценные советы и замечания, а также за поддержку на протяжении всего времени обучения в докторантуре.

Автор выражает благодарность д.т.н., профессору кафедры «Транспортная техника и логистические системы» Кадырову А.С., д.т.н., профессору кафедры «Технологические машины и оборудование» КазАТУ, члену Международного Союза машиностроителей Шерову К.Т., PhD, заведующему кафедрой «Технологическое оборудование, машиностроение и стандартизация» Мусаеву М.М., PhD, ассоц. профессору Юрченко В.В. за помощь в выборе научного направления, за ценные рекомендации и научное сопровождение.

Автор выражает благодарность зарубежному научному консультанту, PhD, профессору Вильнюсского технического университета им. Гедиминаса, Олегасу Чернашеюсу за организацию и помощь при прохождении зарубежной научной стажировки, а также за помощь в проведении экспериментальных исследований.

Автор выражает благодарность коллегам с кафедры «Технологическое оборудование, машиностроение и стандартизация» старшему преподавателю Матешову А.К. и PhD, ассоциированному профессору Нуржановой О.А., за помощь в организации и проведении аналитических исследований и методическую помощь при выполнении работы, также благодарность к.т.н., ассоциированному профессору Бартеневу И.А. за предоставление лаборатории сварки для проведения экспериментов. Автор выражает благодарность PhD, ст.преп. кафедры «Механика» Доненбаеву Б.С. и декану ФИТ Калинину А.А. за помощь при выполнении и оформлении работы.

Автор выражает благодарность и глубокую признательность начальнику конструкторско-технологического отдела Производства №3 (Энергозавод), Щетинникову И. В., главному конструктору ТОО "Курылысмет" РГТО «Құрылысмет №1» Шляхову С.В. за помощь, оказанную при работе над диссертацией, предоставленные информационные материалы и уделенное время при консультировании по теме исследований.

Автор выражает благодарность и глубокую признательность директору по сервисному центру ТОО «Kaztechpro» Киму В.Н. за внедрение исследований докторской диссертации на производстве, инженеру-гидравлику КФ ТОО «Ганза-Флекс Гидравлик Алматы» Ашимбаеву Д.А. за внедрение исследований докторской диссертации на производстве.