

АННОТАЦИЯ

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

НУРЖАНОВОЙ ОКСАНЫ АМАНГЕЛЬДЫЕВНЫ

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СОПРЯГАЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ТИПА ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ

Актуальность диссертационной работы. Диссертация выполнена в рамках Государственной программы индустриально-инновационного развития Республики Казахстан на 2015-2019 и 2020-2025 годы, а также «Проекта по усилению промышленной безопасности в Центральной Азии», на соискание степени доктора философии PhD по направлению подготовки 8D071 - «Инженерия и инженерное дело», по образовательной программе 8D07101 - «Машиностроение».

В современном машиностроении особая роль отводится ремонтному производству в виду того, что на сегодняшний день более 40% импорта в Казахстане составляет продукция машиностроения, которая включает в себя оборудование горно-металлургического комплекса, сельхозтехнику, автомобили и многое другое.

Основные показатели качества машин, механизмов, деталей и узлов закладываются на стадиях жизненного цикла изделия - это этапы проектирования, конструирования, производства, но дефекты возникают зачастую на этапе эксплуатации. Большинство этих деталей изготавливают из труднообрабатываемых материалов, обрабатываемость которых в разы хуже, чем у обычных конструкционных материалов. Поэтому организация ремонта и управление ремонтным хозяйством занимает важное место в производственной инфраструктуре любого предприятия, а развитие данной отрасли является важным вопросом для обеспечения экономической основы страны.

Изучая работу ремонтных предприятий Карагандинского региона, было установлено, что чаще всего ремонту подлежат детали типа тел вращения динамического оборудования сложной геометрии иностранного производства. 60% деталей типа тел вращения в настоящее время направляется на ремонт и восстановление после износа в результате эксплуатации для использования их остаточного ресурса.

Восстанавливая такие детали, машиностроительные и ремонтные предприятия Карагандинского региона, тратят большое количество наплавочного материала из-за полного восстановления всей детали и большого количества режущего инструмента, поскольку восстанавливаемые поверхности

обладают высокой твердостью, и поэтому необходима разработка ресурсосберегающей технологии восстановления, обеспечивающей качественные характеристики восстановленных деталей.

Одним из наиболее распространенных соединений, во многом определяющий ресурс ходовой части и машины в целом, являются шлицевые соединения. В процессе эксплуатации детали этих соединений приобретают большое количество разнообразных дефектов: смятие и износ рабочих поверхностей зубьев ступицы и вала, поломка зубьев, заедание и т.п.

В настоящее время почти нет машин и механизмов, в которых не было бы передачи зацеплением. Из различных типов передач шлицевые соединения получили широкое распространение в ряде областей машиностроения, что объясняется их высокой нагрузочной способностью, конструктивными и технологическими преимуществами перед другими видами соединений типа вал-втулка. Шлицевые соединения применяются для посадки на вал зубчатых колес, муфт, дисков, фланцев, маховиков, звездочек цепных передач и так далее. Надежность и качество работы машин и механизмов во многом зависят от работы шлицевых соединений.

Шлицевые соединения отличаются большим разнообразием форм и размеров, являются напряженными и сложными деталями в конструктивном и технологическом отношении.

При ремонте шлицевые валы и втулки после выбраковки, как правило, заменяют новыми. Это ведет к значительному повышению стоимости ремонта, а при многократной замене деталей в течение амортизационного периода работы машины стоимость их может превысить стоимость не только всего узла, но и машины. По этой причине вопрос о восстановлении деталей со шлицевыми поверхностями представляет определенный интерес, так как разработка технологии восстановления позволит снизить стоимость ремонта всей машины.

На сегодняшний день существует много исследований в области технологий ремонта шлицевых поверхностей, однако, несмотря на богатый опыт и результаты исследований, ремонт этих поверхностей с использованием ресурсосберегающих технологий остается стратегически важной задачей, особенно в контексте Казахстана. Известно, что ремонт и восстановление шлицевых поверхностей деталей типа тел вращения экономически более выгодны, чем закупка новых деталей. С учетом того, что Казахстан стремится к экономии ресурсов и оптимизации расходов, вопрос исследования эффективных ресурсосберегающих технологий ремонта является актуальным.

Гипотезой исследования является предположение о возможной связи и закономерности между технологическими параметрами процессов наплавки и механической обработки с основными количественными показателями качества нанесенного и обработанного слоя при восстановлении.

Целью исследования является научное обоснование и экспериментальная разработка технологии и инструмента при восстановлении деталей типа тел вращения, на основе подбора оптимальных технологических режимов с учетом минимизации затрат.

Для достижения цели решены следующие **задачи**:

- определены конструктивные особенности изношенных поверхностей деталей типа тел вращения, способы и технологии их восстановления;
- разработана математическая модель расчета технологических параметров наплавки с учетом твердости наплавленного слоя;
- исследованы износостойкость наплавленных поверхностей с учетом технологических параметров наплавки;
- исследованы тепловые и деформационные процессы наплавки и механической обработки деталей типа тел вращения;
- разработана ресурсосберегающая технология восстановления сопрягаемых поверхностей деталей типа тел вращения с учетом определения оптимальных режимов наплавки и механической обработки;
- экономически обоснована разработанная ресурсосберегающая технология восстановления сопрягаемых поверхностей деталей типа тел вращения.

Методы исследования. Поставленные в работе задачи решались практическими и теоретическими методами. К теоретическим методам, которые использовались в данной диссертации, относятся методы проектирования и конструирования режущих инструментов, технологии наплавки изношенных поверхностей, теория резания материалов, технологии обработки металлов, технологии машиностроения, методы определения физико-механических свойств наплавки.

Экспериментальные исследования по наплавке проводились в условиях лаборатории лаборатории Казахстанского института сварки Карагандинского технического университета имени Абылкаса Сагинова с использованием полуавтоматического аппарата ПДГ-252 фирмы SELMA.

Измерение твердости наплавленного слоя проводились на оборудовании испытательной лаборатории инженерного профиля КарТУ имени Абылкаса Сагинова «Комплексное освоение полезных ископаемых».

Износостойкость наплавленных поверхностей определялась в лаборатории кафедры машиностроения и материаловедения Вильнюсского технического университета имени Гедиминаса.

В процессе проведения диссертационных исследований использовались следующие пакеты прикладных программ: AutoCAD, КОМПАС-3D Viewer, EXCEL, Ansys Workbench 19.2 с расширением Welding Distortion, BETA CAE System, ABAQUS.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

1. Создана технология восстановления сопрягаемых шлицевых поверхностей деталей типа тел вращения: которая включает:

- совершенствование технологического процесса наплавки шлицевых поверхностей;

- разработку конструкции сборной дисковой фрезы со сменными пластинами для размерной обработки шлицев.

2. Получено уравнение для оценки твердости наплавленного слоя в зависимости от силы сварочного тока, сварочного напряжения, скорости подачи проволоки при полуавтоматическом способе наплавки.

3. Впервые смоделировано тепловое и деформированное состояние наплавленных поверхностей с использованием программы ANSYS Workbench 19.2 и дополнительных расширений WeldingDistortion и MovingHeatSource и установлено, что при наплавке полуавтоматическим способом:

- оптимальные технологические режимы уменьшают термическое влияние на восстанавливаемую поверхность;

- оптимальные технологические режимы обеспечивают минимальные деформации.

4. Впервые смоделировано напряженно-деформированное состояние новой конструкции сборной дисковой фрезы со сменными пластинами с учетом режимов резания и цикличности нагружения в программе BETA CAE System/ ABAQUS и обоснована работоспособность данной конструкции.

Научные положения, выносимые на защиту:

– технология восстановления сопрягаемых шлицевых поверхностей деталей типа тел вращения;

- результаты экспериментального исследования оценки твердости и износостойкости наплавленного слоя;

- уравнение для оценки твердости наплавленной поверхности;

- результаты моделирования процесса наплавки с использованием программного комплекса Ansys Workbench и результаты моделирования прочностного расчета конструкции инструмента с использованием BETA CAE SYSTEM/ ABAQUS;

- техническое задание по разработке сборной фрезы для размерной обработки шлицев.

Автор защищает:

1. Конструктивные решения

2. Математическую модель

3. Результаты экспериментальных исследований

4. Предлагаемую технологию восстановления шлицевых поверхностей.

Объектом исследования являются технологические процессы восстановления изношенных поверхностей деталей типа тел вращения..

Предмет исследования: взаимосвязи и закономерности между технологическими параметрами режимов наплавки и механической

обработки с основными количественными показателями качества нанесенного и обработанного слоя при восстановлении.

Практическая значимость исследования заключается в:

- установлении оптимальных режимов полуавтоматической наплавки и фрезеровании наплавленных поверхностей деталей типа тел вращения;
- разработке методики определения температурных полей в процессе наплавки в Ansys Workbench;
- разработке опытного образца сборной дисковой фрезы со сменными пластинами для размерной обработки наплавленных шлицевых поверхностей;
- методике прочностного расчета конструкции сборной дисковой фрезы со сменными пластинами в BETA CAE System/ ABAQUS;
- разработке рекомендаций по использованию ресурсосберегающей технологии восстановления шлицевых поверхностей деталей типа тел вращения.

Результаты исследования и внедрены в производство ТОО «Hansa-Flex Гидравлик Алматы» (г.Караганда).

Краткое содержание.

В первой главе выполнен анализ состояния проблемы исследования, определены конструктивные особенности изношенных поверхностей деталей типа тел вращения. Сделан обзор существующих способов восстановления деталей типа тел вращения наплавкой, а также обзор способов механической обработки наплавленных шлицевых поверхностей.

Во второй главе методика и результаты экспериментальных исследований полуавтоматического способа и режимов наплавки сопрягаемых поверхностей деталей типа тел вращения. Исследованы твердость и износостойкость наплавленного слоя, разработана математическая модель зависимости твердости наплавленного слоя от технологических режимов наплавки.

В третьей главе проведено имитационное моделирование процесса наплавки с разработкой модели, установлением задания и анализом задач теплопереноса и структурно-статической задачи с последующим анализом результатов. В ходе моделирования установлены режимы наплавки шлицевых поверхностей деталей типа тел вращения, которые подтверждают выводы, полученные в ходе экспериментальных исследований, а также что при увеличении параметров силы тока ($I =$ от 135 до 260 А), напряжения ($U =$ от 17,5 до 24 V) в режимах наплавки существует тенденция к увеличению остаточных деформаций (от 0,23 мм до мм 0,39).

В четвертой главе разработана специальная конструкция инструмента для механической обработки наплавленных поверхностей деталей типа тел вращения. Произведен расчет и конструирование сборной фрезы для размерной обработки шлицев, а также имитационное моделирование

напряженного состояния фрезы сборной со сменными пластинами в процессе механической обработки.

Проведенный динамический анализ показал степень использования инструмента в процентном выражении 79% (соответствует запасу прочности $\approx 20\%$), что является достаточным условием. Разработанная конструкция фрезы сборной со сменными пластинами удовлетворяет нормативному коэффициенту запаса прочности, что позволяет ее применение при обработке наплавленных поверхностей.

В пятой главе произведен расчет экономической эффективности предлагаемой ресурсосберегающей технологий восстановления шлицевых поверхностей деталей. Рассчитана полная себестоимость продукции, определена прибыль предприятия и период окупаемости продукции.

Разработаны рекомендации для производства по наплавке изношенных шлицевых валов, а также чертежи для изготовления специальной сборной фрезы для размерной обработки шлицев.

Личный вклад диссертанта. Работа выполнена автором лично, автор выполнил патентный анализ известных конструкций металлорежущих инструментов, 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 конструкция сборной дисковой фрезы, определены оптимальные технологические режимы наплавки и проведены экспериментальные исследования по определению твердости и износостойкости наплавленного слоя.

Публикация и апробация работы. Основные положения диссертации опубликованы в 11 научных работах на русском и английском языках, в том числе: 2 статьи в журналах базы Scopus с процентилем не менее 25 (Journal of Applied Engineering Science (47%), Tehnički vjesnik (41%)), 3 статьи в изданиях, рекомендованных Комитетом по обеспечению качества в сфере образования и науки РК, 1 статья в базе РИНЦ RSCI. Результаты исследований докладывались и обсуждались на международных научных конференциях: X Международная научно-техническая конференция (г.Омск, 26–28 апр. 2021 г.), Международная научно-практическая конференция «Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации» (Сагиновские чтения №13), (г. Караганда, 2021 г.), III Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием, (г. Тула, 2022), Международная научно-практическая конференция «Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации» (Сагиновские чтения №14), (г. Караганда, 2022 г.), Международная научно-практическая конференция «Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации» (Сагиновские чтения №15), (г. Караганда,

2023 г). Получен 1 патента РК на полезную модель и 1 свидетельство о государственной регистрации прав на объект авторского права. Во всех публикациях представлены материалы и результаты теоретических и экспериментальных исследований процессов восстановления изношенных поверхностей деталей типа тел вращения и последующей механической обработки наплавленного слоя.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа изложена на 144 страницах машинописного текста, состоит из введения, 5 разделов и заключения, включает 75 рисунков, 36 таблиц, список использованных источников из 98 наименований и 9 приложений.

Результаты исследования и основные выводы.

Диссертационная работа содержит новые научно-обоснованные теоретическо-экспериментальные результаты, совокупность которых имеет важное значения для восстановления сопрягаемых поверхностей деталей типа тел вращения.

В результате научно-исследовательской работы решена важная научно-практическая задача прикладного характера, которая позволила сделать следующие выводы:

1. В результате исследования подтверждена гипотеза о возможной связи и закономерности между технологическими параметрами процессов наплавки и механической обработки с основными количественными показателями качества нанесенного и обработанного слоя при восстановлении.

2. Определены конструктивные особенности изношенных поверхностей деталей типа тел вращения, способы и технологии их восстановления.

3. Установлен оптимальный режим полуавтоматической наплавки: сила сварочного тока $I = 135\text{A}$, сварочное напряжение $U = 17,5\text{В}$, скорость подачи проволоки 2 м/мин, при котором обеспечивается требуемая твердость наплавленного слоя 40 HRC, что максимально близко к твердости шлицевого вала по техническим требованиям 42...56 HRC.

4. Получено эмпирическое уравнение регрессии при определении твердости в зависимости силы сварочного тока, напряжения и скорости подачи проволоки имеет вид: $Y = 752.8998 + 0.4256X_1 - 22.9583X_2 - 5.2646X_3$.

5. Установлено, что возникает тенденция к постепенному росту температуры исходной детали от источника наплавки (от 22 до 1460 °С) и наблюдается эллипсоидное удлинение температурных полей. Установлено, что при увеличении параметров ($I =$ от 135 до 260 А, $U =$ от 17,5 до 24 В) в режимах наплавки существует тенденция к увеличению остаточных деформаций (от 0,23 мм до мм 0,39).

6. Сконструирована сборная фреза со сменными многогранными пластинами для размерной обработки шлицев для восстановления первоначальной геометрии и размеров, восстановленных методом местной

наплавки шлицевых деталей типа тел вращения, в целях усовершенствования технологического процесса ремонта детали.

7. В ходе проведения моделирования физического процесса резания была подтверждена работоспособность проектируемой конструкции фрезы в программе BETA CAE SYSTEM, ABAQUS. Проведенный динамический анализ показал, что разработанная конструкция фрезы сборной со сменными пластинами удовлетворяет нормативному коэффициенту запаса прочности, что позволяет ее применение при обработке наплавленных поверхностей.

8. Разработана технология восстановления шлицевых поверхностей деталей типа тел с учетом регулирования технологических режимов наплавки и ресурсосбережения при механической обработки.

9. Результаты диссертационной работы были внедрены в производственный процесс ТОО «HANSA-FLEX Hydraulik Almaty». Расчет экономической эффективности показал, что использование сборной фрезы для размерной обработки шлицев при восстановлении позволит сэкономить 1 852 265,5 тенге в год. Себестоимость горизонтально-фрезерной операции с сокращением одного перехода позволит сэкономить 107806,8 тенге, а также сократить время, затрачиваемое на операцию на 10,657 мин. Разработаны рекомендации по наплавке изношенных шлицевых валов, а также техническое задание и чертежи для изготовления сборной фрезы для размерной обработки шлицев.

Период окупаемости, в течение которого инвестиции в производство вернутся потоком чистой прибыли, составляет 0,12 лет.

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» 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, Витаутасу Бучинскому, PhD, ассоциированному профессору Олегасу Чернашеюсу за организацию и помощь при прохождении зарубежной научной стажировки, а также за помощь в проведении экспериментальных исследований.

Автор выражает благодарность старшим преподавателям кафедры «Технологическое оборудование, машиностроение и стандартизация» Жуковой А.В., Жунуспекову Д.С., за помощь в организации и проведении аналитических исследований и методическую помощь при выполнении работы.

Автор выражает благодарность и глубокую признательность начальнику цеха ЦГЦА "АрселорМиттал" Темиртау, Берг А.А., САЕ-инженеру ТОО «SimuCOMP» Берг А.А., главному конструктору ТОО "Курылысмет" РГТО «Құрылысмет №1» Шляхову С.В. за помощь в создании инструмента, ценные советы и рекомендации.

Бывшему начальнику Производства №3 (Энергозавод), Жолшорину Б. Т., начальнику конструкторско-технологического отдела Производства №3 (Энергозавод), Щетинникову И. В. за помощь, оказанную при работе над диссертацией, за предоставленные информационные материалы и за уделенное время на консультирование по теме исследований.

Магистрам Бессонову А., Лапкину В., за совместную работу в проведении научных исследований и экспериментов.