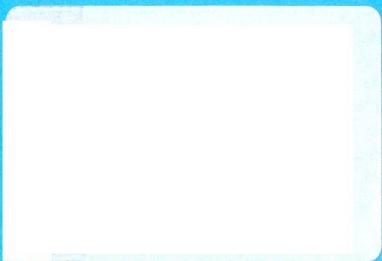


УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«ПОЛОЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УДК 621.791.92+621.793(043.2)



**ВИГЕРИНА**  
Татьяна Владимировна

**ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ  
ВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ ВАЛОВ ПУТЕМ УПРАВЛЕНИЯ  
СОСТАВОМ И СТРУКТУРОЙ МАТЕРИАЛА ПОКРЫТИЙ**

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальности  
05.16.09 – Материаловедение (машиностроение)

Новополоцк, 2010

Работа выполнена в УО «Полоцкий государственный университет»

Научный руководитель

**Иванов Владимир Петрович,**  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры «Технология конструкционных  
материалов» учреждения образования  
«Полоцкий государственный университет»

Официальные оппоненты:

**Соколов Юрий Валентинович,**  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры «Материаловедение  
в машиностроении» Белорусского национального  
технического университета

**Белоцерковский Марат Артемович,**  
кандидат технических наук, доцент,  
заведующий лабораторией газотермических методов  
упрочнения деталей машин Государственного  
научного учреждения «Объединенный институт  
машиностроения НАН Беларуси»

Оппонирующая  
организация:

учреждение образования  
«Белорусский государственный  
аграрный технический университет»

Защита состоится 4 февраля 2011 г. в 14 часов на заседании совета по защите диссертаций К 02.19.03 при учреждении образования «Полоцкий государственный университет» по адресу: 211440, г. Новополоцк, ул. Блохина, 29, конференц-зал библиотеки ПГУ, тел. +375 214 53-10-47, e-mail: post@psu.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Полоцкий государственный университет».

Автореферат разослан 3 января 2011 г.

Ученый секретарь  
совета по защите диссертаций  
кандидат технических наук, доцент

А.Л. Лисовский

© Т.В. Вигерина, 2010  
© УО «ПГУ», 2010

## **ВВЕДЕНИЕ**

Одним из основных направлений развития науки и техники является повышение надежности машин, в котором важную роль играет увеличение ресурса их деталей. Восстановление и упрочнение изношенных деталей с доведением их геометрических параметров и эксплуатационных свойств до показателей новых деталей особенно актуально для Республики Беларусь, где недостаточно сырьевых ресурсов для производства машин.

Восстановление валов с нанесением на поверхности шеек износостойких покрытий – один из наиболее радикальных путей увеличения их срока службы и важная задача ресурсосбережения. Это также решает проблему импортозамещения за счет уменьшения потребления запасных частей.

Коленчатые валы (двигателей, насосов, компрессоров) – самые сложные и дорогостоящие детали класса «валы». Их стоимость составляет 10 – 25 % стоимости агрегатов, а при достижении предельного состояния выбраковываются около 25 % валов. Восстановление валов с использованием покрытий, наносимых при помощи высокотемпературных источников тепла, позволяет быстро и качественно обеспечить износостойкость шеек, но при этом усталостная прочность снижается на 25 – 30 %, а операции, используемые для ее повышения, энергоемкие или основаны на использовании дорогостоящих материалов.

В настоящее время недостаточно полно решена задача комплексного повышения основных эксплуатационных свойств валов при их восстановлении. Поэтому разработка процессов восстановления коленчатых валов, позволяющих получить состав и структуру материалов покрытий, обеспечивающих износостойкость и усталостную прочность валов на уровне новых изделий, представляет интерес для ремонтного производства.

Таким образом, нами сформулирована следующая научная задача – обеспечение эксплуатационных свойств (износостойкости и усталостной прочности) восстанавливаемых валов, близких к свойствам новых деталей, управлением микроструктурой материала покрытий за счет выбора их состава и оптимизации процесса нанесения и обработки.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Связь работы с крупными научными программами и темами.** Работа выполнена в рамках следующих научно-исследовательских тем:

– МПФИ «Разработать теорию и технологию ресурсосберегающего поверхностного плазменного легирования деталей дробеметных установок литьевого производства» (№ ГР 200112609, ГБ 51-21, 2001 год);

– внутривузовская тема «Создание теоретических и технологических основ диагностирования сварных объектов, обработка диффузионно-

легированных порошков, различных покрытий композиционных материалов из них» (ГБ № 5426, 2005 – 2010 годы).

**Цель и задачи исследования.** Цель работы – повышение износостойкости и усталостной прочности восстанавливаемых стальных и чугунных валов путем управления составом, структурой и свойствами материалов наносимых покрытий.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

1. Выбор материалов для нанесения покрытий и анализ процессов восстановления коленчатых валов с нанесением покрытий на изношенные шейки.

2. Обоснование методик для определения физико-механических характеристик наносимых покрытий и эксплуатационных свойств восстановленных деталей.

3. Определение влияния состава и грануляции порошкового материала и режимов напыления валов из высокопрочного чугуна на температурный коэффициент линейного расширения материала покрытия и внутренние напряжения второго рода в нем.

4. Изучение влияния состава материала и режимов наплавки стальных валов на структуру и свойства покрытий. Выявление особенностей механизма разрушения валов с наплавленными покрытиями, работающих в условиях циклического нагружения, и влияние технологических режимов нанесения и поверхностной пластической обработки на строение и свойства покрытий.

5. Разработка и промышленное освоение технологических процессов восстановления коленчатых валов.

*Объектом исследования являлись восстанавливаемые валы, образцы и материалы покрытий. Предмет исследования – влияние химического состава исходного материала покрытий, режимов его нанесения на восстанавливаемые поверхности, последующего поверхностного пластического деформирования (ППД) на структуру материала покрытий и, как следствие, на эксплуатационные свойства восстанавливаемых валов.*

#### **Положения диссертации, выносимые на защиту:**

– особенности структурообразования износостойкого материала покрытий при наплавке шеек стальных валов проволокой Св-08Х13, включающего формирование пересыщенного твердого раствора хрома и углерода в Fe<sub>α</sub> с мелкодисперсными включениями карбida хрома с преимущественной ориентацией структурных составляющих в радиальном направлении, выделение вторичных карбидов хрома и изменение ориентации структурных составляющих вдоль обрабатываемой поверхности под влиянием контактного давления, что препятствует росту усталостных радиально ориентированных трещин и обеспечивает сопротивление усталостным разрушениям с коэффициентом корреляции интенсивности изнашивания и усталостной прочности –0,798;

– механизм образования усталостных трещин в детали с покрытием, включающий стадии их зарождения, медленного и ускоренного роста, опре-

деляющий место зарождения трещин и условия повышения усталостной прочности детали, устанавливающий, что трещины с краями, имеющими следы участков с усталостными бороздками и фасетками межзеренного разрушения, зарождаются в переходной зоне между материалом покрытия и детали, а при отношении микротвердости материала покрытия и детали более 1,6 и уменьшении переходной зоны с 65 – 70 до 5 – 10 мкм предел выносливости повышается в 1,4 – 1,5 раз;

– зависимость осевой деформации наплавленного элемента детали от модуля упругости, температуры нагрева и температурного коэффициента линейного расширения материалов детали и покрытия, размеров наносимого валика материала, позволяющая прогнозировать растягивающие напряжения в покрытии и ограничить осевую деформацию наплавленного изделия за счет уменьшения числа наплавок детали до двух в течение срока ее службы;

– процесс восстановления коленчатых валов из высокопрочного чугуна напылением покрытий с применением исходного материала в виде смеси порошков: самофлюсующегося ПГ-10Н-01 (50 %), железного ПЖ-5М (30 %), медного ПМС-1 (10 %) и алюминиевого на никелевой основе ПН85Ю15 (10 %), обеспечивающий интенсивность изнашивания шеек  $4,1 \cdot 10^{-6}$  г/м с экономическим эффектом 3710 руб. на один вал;

– процесс восстановления по оптимальным режимам стальных коленчатых валов наплавкой проволокой Св-08Х13 с последующим ППД с помощью разработанной оснастки, обеспечивающий повышение предела выносливости на 25 – 30 % (205 МПа) и интенсивность изнашивания упрочненных поверхностей  $5,5 \cdot 10^{-6}$  г/м с экономическим эффектом 8042 руб. на один вал.

**Личный вклад соискателя.** Основные положения, выводы и рекомендации диссертации принадлежат автору. Совместно с руководителем работы д-ром технических наук В.П. Ивановым, выбрано научно-техническое направление и определены задачи исследования. Автор работы провел комплекс теоретических и экспериментальных исследований и предложил процессы восстановления коленчатых валов, обеспечивающие эксплуатационные показатели, соответствующие показателям новых валов.

**Апробация результатов диссертации.** Основные результаты исследований доложены и обсуждены: на VI междунар. науч.-техн. конф. «Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин» (Новополоцк, ПГУ, 25 – 27 апреля 2007 г.); 7-й междунар. науч.-техн. конф. «Инженерия поверхности и реновация изделий» (Ялта, АТМУ, 29 – 31 мая 2007 г.); Lucrari stiintifice volumul 21 «Inginerie agrara si transport auto», (Chisinau 2008); 9-м науч.-техн. семинаре «Современные проблемы подготовки производства, заготовительного производства, обработки, сборки и ремонта в промышленности и на транспорте» (Свалява, АТМУ, 23 – 27 февраля 2009 г.); междунар. науч.-практ. конф. «Опыт, проблемы и перспективы развития технического сервиса в АПК» (Минск, БГАТУ, 15 – 18 апреля 2009 г.);

VII междунар. науч.-техн. конф. «Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин» (Новополоцк, ПГУ, 29 – 30 апреля 2009 г.); VI междунар. науч.-практ. конф. «Тракторы и автомобили» (Горки, БСХА, 24 – 25 сентября 2009 г.); междунар. науч.-практ. конф. «Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве» (Минск, НПЦ НАН Беларусь по механизации сельского хозяйства, 21 – 22 октября 2009 г.); междунар. науч.-техн. конф. «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии» (Могилев, Белорус.-Рос. ун-т, 22 – 23 апреля 2010 г.); II междунар. науч.-практ. конф. «Инженерия поверхностного слоя деталей машин» (Минск, БНТУ, 27 – 28 мая 2010 г.).

**Опубликованность результатов.** Основные результаты исследований опубликованы в 16 научных работах объемом 2,1 авторских листа, в том числе 5 статьях в рецензируемых изданиях, 9 статьях в научных сборниках и в материалах конференций. Имеется один патент Республики Беларусь на полезную модель. Общий объем опубликованных печатных работ – 69 страниц.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, 5 глав, заключения, библиографического списка и приложений. Работа изложена на 174 страницах машинописного текста, включает 50 рисунков на 19 страницах, 18 таблиц на 10 страницах, список использованных источников в количестве 197 наименований на 15 страницах, список публикаций соискателя в количестве 17 наименований на 2 страницах и 13 приложений на 28 страницах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, определена цель, направленная на решение задачи повышения качества восстановленных валов, которое оценивалось их усталостной прочностью и износостойкостью трущихся шеек.

**В первой главе** рассмотрены условия работы валов агрегатов машин, которые подвергаются действию комбинированных циклических нагрузок, вызывающих накопление усталостных дефектов и износ шеек. Восстановление изношенных валов путем нанесения покрытий на их шейки является одним из наиболее целесообразных путей увеличения срока службы. Исследования выполнены на примере восстановления коленчатых валов автомобильных двигателей с шейками диаметром 50 – 70 мм.

Восстановлению валов посвящено большое количество работ, среди которых труды В.И. Черноиванова, В.П. Лялякина, И.Е. Ульмана, Н.Н. Дорожкина, В.К. Ярошевича, М.А. Белоцерковского, В.С. Ивашко, Л.Ф. Баранова, В.Э. Завистовского и др.

Необходимость повышения качества восстановления валов сохраняется. Для оценки послеремонтной надежности агрегатов с восстановленными валами определялась наработка трех групп автомобильных двигателей, которые

исчерпали свой ресурс в эксплуатации преимущественно на дорогах третьей категории. Двигатели прошли капитальный ремонт на ОАО Полоцкий завод «Проммашремонт». В первую группу вошли 28 двигателей ЗМЗ-53, во вторую – 30 двигателей ЗМЗ-24, в третью – 30 двигателей ГАЗ-52. Девяносто процентная и нормативная наработка соответственно составила: для двигателей ЗМЗ-53 64,4 и 112 тыс. км; ЗМЗ-24 – 86,5 и 112 тыс. км; ГАЗ-52 – 68,5 и 88 тыс. км. Наибольшая доля дефектов (~ 45 %), обнаруженных в гарантийный период эксплуатации, приходится на износ восстановленных поверхностей с покрытиями. Изломы деталей составили около 34 % отказов, а доля дефектов, обусловленных недопустимыми погрешностями механической обработки, – 4 %. Остальные дефекты – результат низкой технологической дисциплины. Основное внимание в проводимых исследованиях уделялось повышению износостойкости и усталостной прочности восстановленных шеек коленчатых валов.

Работы И.А. Однига, В.В. Болотина, В.С. Ивановой, В.Ф. Терентьева, Е.К. Почтенного, Н.В. Олейника, Л.М. Школьника и др. большей частью посвящены развитию теории усталостной прочности изготовленных деталей. Однако закономерности, характерные для механизма их усталостного разрушения, требуют уточнения при переходе к механизму усталостного разрушения деталей с покрытиями. Особенность работы таких деталей заключается в учете растягивающих остаточных напряжений при нанесении покрытий, которые оказывают решающее влияние на механизм усталостного разрушения, увеличивая скорость его развития.

Для получения высоких эксплуатационных свойств восстановленных валов необходимо обеспечить получение гетерогенной структуры материала покрытия. Наплавочные сплавы на железной основе содержат 0,7 – 2,5 % углерода. Наиболее применимы для легирования хром и марганец, хотя многие сплавы легированы также вольфрамом, ванадием, бором и никелем. Реже в сплавы вводят титан, молибден, кремний и кобальт. Гетерогенные покрытия, состоящие из матрицы и карбидов, позволяют регулировать состояние последних содержанием легирующих элементов. На формирование типа карбидов значительное влияние оказывает соотношение хрома и углерода, а на формирование свойства матрицы – никель и марганец, но высоколегированные материалы аустенитного класса дорогостоящи, поэтому одной из задач исследования являлся выбор недорогого наплавочного материала, обеспечивающего при наплавке требуемые эксплуатационные свойства.

Во второй главе представлен общий методологический подход к выполнению работы и выбраны методики и оборудование для проведения экспериментов с минимальной погрешностью. Поставленные в работе задачи решались теоретическими (анализ, синтез, аналогия и др.) или экспериментальными методами.

Напыление материалов проводили на установке для плазменного напыления заводской конструкции, плазменную струю получали с использо-

ванием плазменной горелки ГН-25, в качестве плазмообразующего газа использовали азот. Для напыления шеек валов использовали смесь порошков: самофлюсующегося ПГ-10Н-01 (50 %), железного ПЖ-5М (30 %), медного ПМС-1 (0 – 15 %) и алюминиевого на основе никеля ПН85Ю15 (5 – 20 %). Наплавку коленчатых валов в среде защитных газов [Ar + (20 – 30 % CO<sub>2</sub>)] вели на стенде заводской конструкции. Наплавочный материал выбирался из проволок ПП-Нп-80Х20Р3Т, Св-08Х13 и У7 с различным содержанием углерода и легирующих элементов.

Микротвердость структурных составляющих материалов исследовали на микротвердомерах ПМТ-3 по ГОСТ 9450-76 и BUEHLER Model No 1105D. Твердость покрытий исследовали методами Бринелля (ГОСТ 9012) на приборе ТШ-2, Роквелла (ГОСТ 9013) на приборе ТК и Викерса (ГОСТ 9450) на приборе ИТ2010-10.

Микроструктуру наплавленного слоя изучали на микрошлифах при помощи металлографического микроскопа Nicon Model Epiphot 200 при увеличениях ×100, ×200 и ×500. Исследования изломов наплавленных образцов проводили также с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) LEO 1420 при увеличении ×8000 – 13000.

Температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) материала покрытия определяли тензометрическим методом.

Искажения кристаллической решетки определяли на дифрактометре ДРОН-7. Внутренние напряжения второго рода σ" частиц покрытия определяли по формуле: σ" = Δa/a·E/(1 + μ), МПа; где Δa/a – искажение кристаллической решетки; E – модуль упругости первого рода, МПа; μ – коэффициент Пуассона.

Интенсивность изнашивания образцов с покрытиями исследовали на машине трения СМЦ-2 по схеме «диск – колодка» (материал вкладышей подшипников скольжения АО20-1) путем измерения массового износа. Скорость скольжения составляла 2,68 м/с для стальных образцов и 2,93 м/с – для чугунных. Давление на трущиеся поверхности было определено из условия прочности материала вкладыша и составляло 9 МПа. Интенсивность изнашивания образцов  $I_m$  в ходе испытаний оценена потерей массы  $\Delta m$ , отнесенной к пути трения  $L$ , т. е.  $I_m = \Delta m/L$ , г/м.

Усталостные испытания проводились на машине УКИ-10М. В связи с тем, что на восстановление поступают валы, выработавшие межремонтный ресурс, а микроструктура их материала отличается от микроструктуры материала новых валов наличием большего количества дефектов, образцы, изготовленные из стали 45, перед наплавкой подвергались предварительному циклическому нагружению, а затем испытывались. Число циклов нагружения  $N = 1,8 \cdot 10^5$ , амплитуда переменных нагрузений σ<sub>a</sub> = 120 МПа.

Для упрочнения поверхностей в процессе их восстановления ППД в ограниченном пространстве между щеками валов было сконструировано и изготовлено приспособление с обкаточными роликами для галтелей и цилиндрической поверхности шеек валов.

Полученные экспериментальные данные проходили статистическую обработку, которая заключалась в отсеве промахов измерений и определении доверительного интервала. Оптимизация режимов наплавки и последующего ППД проводилась с использованием метода крутого восхождения. Две партии коленчатых валов были восстановлены с использованием результатов диссертационного исследования. Выполнена их технико-экономическая оценка.

**Третья глава** содержит обоснование выбора материала и условий повышения усталостной прочности валов и износстойкости покрытий.

При напылении покрытий возникают внутренние остаточные напряжения в местах сопряжения слоев из разнородных металлов вследствие теплового расширения. Частицы при их ударном осаждении на восстанавливаемую поверхность испытывают значительное пластическое деформирование, отчего материал покрытия приобретает состояние наклепа, который приводит к повышению его прочности, твердости и уменьшению пластичности. Одновременно этот процесс порождает упругие искажения кристаллической решетки, что создает многочисленные препятствия перемещению дислокаций. Управление составом материала (изменением доли порошков ПМС-1 и ПН85Ю15) и режимами его нанесения позволяет влиять на ТКЛР и внутренние напряжения второго рода в нем. Путем обработки экспериментальных данных были выведены уравнения регрессии в виде степенных зависимостей ТКЛР материала покрытия  $a$  и искажений кристаллической решетки в нем  $\Delta a/a$  от влияющих факторов:

$$a = 2,437 \cdot Q^{-0,654} \cdot d_c^{0,671} \cdot Cu^{0,920} \cdot Gr^{-0,669}, \quad (1)$$

$$\Delta a/a = 0,0074 \cdot I^{-0,386} \cdot L^{0,160} \cdot Gr^{-0,218} \cdot d_c^{-0,180}, \quad (2)$$

где  $I$  – сила тока, А;

$Q$  – расход плазмообразующего газа, л/мин;

$L$  – расстояние от сопла до детали, мм;

$d_c$  – диаметр сопла, мм;

$Cu$  – процентное содержание меди;

$Gr$  – грануляция частиц порошка, мкм.

Наибольшее влияние на изменение ТКЛР материала покрытия оказывают процентное содержание меди в исходной композиции порошка, диаметр сопла и грануляция частиц порошка. Увеличение расхода плазмообразующего газа и грануляции частиц порошка приводит к уменьшению ТКЛР материала покрытия, а увеличение значений других факторов – к его увеличению.

Наибольшее влияние на изменение внутренних напряжений второго рода в частицах покрытия оказывают сила тока плазменной дуги и грануляция частиц порошка. Алюминий является одним из наиболее сильных восстановителей для большинства металлов при напылении. С никелем он вступает в экзотермическую реакцию с выделением тепла, что повышает адгезионную

и когезионную прочность покрытий. Медь вводится в материал покрытия в качестве пластификатора и повышает его прочность сцепления с поверхностью детали и износостойкость материала покрытия.

С учетом полученных зависимостей был назначен исходный состав материала покрытия из порошков: ПГ-10Н-01 (50 %), железного ПЖ-5М (30 %), медного ПМС-1 (10 %), алюминиевого на основе никеля ПН85Ю15 (10 %), и режимы напыления: сила тока 325 А, напряжение 70 – 80 В, расход плазмообразующего газа 30 л/мин, расстояние от сопла до детали 150 мм, диаметр сопла 5,5 мм. Использование приведенного состава порошков при напылении позволило получить интенсивность изнашивания материала покрытия  $4,1 \cdot 10^{-6}$  г/м.



Рисунок 1 – Кривые усталости образцов с наплавленными покрытиями

Для восстановления стальных коленчатых валов была исследована наплавка проволоками ПП-Нп-80Х20Р3Т, У7 и Св-08Х13. Анализ кривых усталостной прочности (рисунок 1) и изучение микроструктуры наплавленных покрытий подтвердили предположение о зависимости усталостной прочности образцов от свойств материалов покрытия и основы, размера и строения переходной зоны между покрытием и основой детали (рисунок 2).

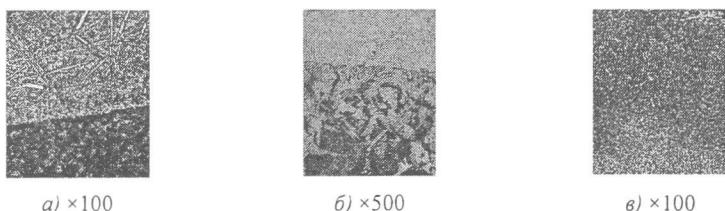
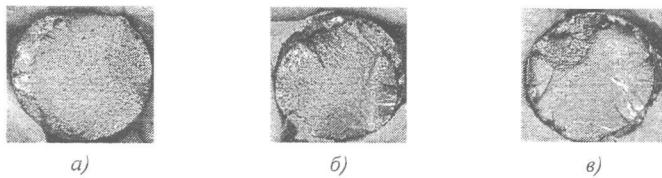


Рисунок 2 – Микроструктура слоя, полученного наплавкой проволоки

Усталостные трещины зарождаются в переходной зоне, затем развиваются вглубь образца или детали, образуя острые надрезы (рисунок 3). Дальнейшее их распространение продолжается до тех пор, пока сечение детали окажется столь малым, что действующие в нем напряжения превысят разрушающие, тогда происходит быстрое хрупкое разрушение. Прочностные свойства переходной зоны ниже, чем у покрытия из-за перемешивания материалов покрытия и подложки.

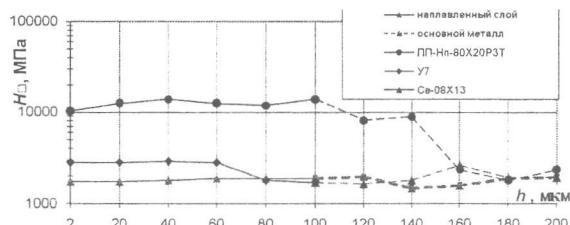


*а – ПП-Нп-80Х20Р3Т; б – Св-08Х13; в – У7*

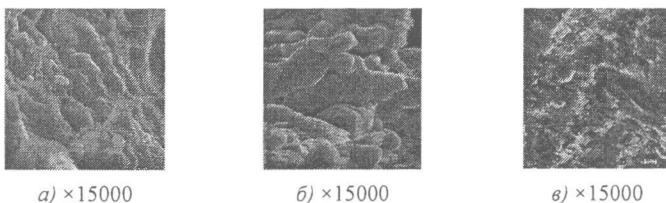
**Рисунок 3 – Поверхности усталостного излома образцов из стали 45, наплавленных проволокой**

Строение, которое приобретает переходная зона между материалами покрытия и подложки, при отношении микротвердости материала покрытия и детали более 1,6 (рисунок 4) оказывает решающее влияние на начало роста магистральной усталостной трещины. Уменьшение переходной зоны с 65 – 70 до 5 – 10 мкм повышает предел выносливости в 1,4 – 1,5 раза.

Фрактографическими исследованиями наплавленных образцов после их разрушения установлена присущая изломам неоднородность, которая выражается в том, что практически во всех случаях наблюдается чередование микроучастков с различной степенью пластического разрушения и наличием участков хрупкого разрушения (рисунок 5).



**Рисунок 4 – Распределение значений микротвердости  $H_{\square}$  по толщине слоя  $h$ , наплавленного проволокой различного состава**



*а – покрытие; б – переходная зона; в – основа*

**Рисунок 5 – Микрорельеф поверхности усталостного излома образца, наплавленного проволокой Св-08Х13**

В ряде случаев могут чередоваться микроучастки внутри- и межзеренного разрушения. Исследование характера изломов наплавленных образцов привело к выводу, что на поверхности излома в зависимости от амплитуды напряжений можно выделить несколько характерных зон: зону чисто усталостного разрушения (рисунок 5, а); переходную зону (рисунок 5, б), характеризующуюся признаками смешанного перехода, в которой наблюдается ямочное разрушение; зону долома (рисунок 5, в), имеющую более гладкий волннообразный рельеф. Переходная зона образуется под действием касательных напряжений при расщеплении зерен по плоскостям скольжения, подготовленным предшествующей деформацией, а размер зоны соответствует области локальной деформации в вершине трещины, образующейся при нагружении перед страгиванием этой трещины. Трещины зарождаются в переходной зоне, их края имеют следы участков с усталостными бороздками и фасетками межзеренного разрушения.

После обкатывания роликом твердость покрытия увеличивается до HRC 35 – 38, которая, хотя и ниже твердости поверхности стали 45 после закалки ТВЧ (HRC 48 – 55), однако обеспечивает интенсивность изнашивания материала покрытия в паре с вкладышем из материала АО20-1 на уровне интенсивности изнашивания шеек новых валов, упрочненных закалкой ТВЧ (рисунок 6).

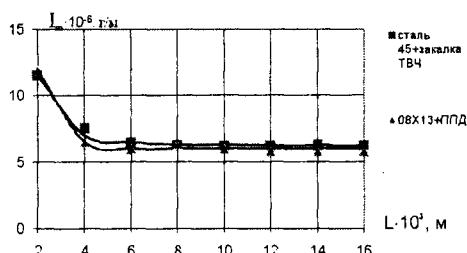


Рисунок 6 – Зависимость интенсивности изнашивания образцов  $I_m$ , прошедших различную упрочняющую обработку, от пути трения  $L$

Уменьшение интенсивности изнашивания материала покрытия и повышение предела выносливости восстановленной детали обеспечено за счет получения микроструктуры наплавленного материала из проволоки Св-08Х13, представляющего собой пересыщенный твердый раствор хрома и углерода в  $\text{Fe}_\alpha$  с мелкодисперсными включениями карбида хрома, обладающего способностью к значительному увеличению твердости (твердость покрытия увеличилась в 1,3 – 1,4 раза). В результате наклена под влиянием контактного давления преимущественная ориентация структурных составляющих из радиального направления изменяется на ориентацию вдоль обрабатываемой поверхности, что препятствует росту усталостных трещин, которые ориентиро-

ваны в основном радиально. Выделение вторичных карбидов хрома при ППД покрытия повышает износостойкость его материала.

Использование для наплавки в среде защитных газов проволоки Св-08Х13 обеспечивает предел выносливости при консольном нагружении образцов 205 МПА и интенсивность изнашивания упрочненных поверхностей  $5,5 \cdot 10^{-6}$  г/м (с коэффициентом корреляции интенсивности изнашивания и усталостной прочности -0,798).

Нанесение покрытий с использованием источников тепла уменьшает длину восстанавливаемого вала из-за неодновременного и неравномерного нагрева и охлаждения участков детали и покрытия. Это особенно заметно для наплавленных валов, в сравнении с напыленными валами, так как для первых характерен нагрев до большей температуры с расплавлением поверхностных слоев металла восстанавливаемых шеек. Длина коленчатых валов после нескольких наплавок уменьшается до 3 мм за счет возникновения внутренних напряжений в материале покрытия и детали.

С учетом условия, что материал валика в направлении оси детали будет растянут под действием силы  $P_{pc} = \sigma_p \left[ \frac{\pi \cdot (d+a)^2}{4} - \frac{\pi \cdot (d-a)^2}{4} \right]$ , а материал шейки детали под валиком сжат под действием силы, равной по величине:  $P_{ex} = \frac{\Delta}{b} \cdot E_\theta \cdot \frac{\pi \cdot (d-a)^2}{4}$ , была составлена система уравнений, решение которой позволило рассчитать осевую деформацию  $\Delta$ :

$$\Delta = \frac{E_s \cdot d \cdot a \cdot (t_n - t_k) \cdot b \cdot \alpha}{\left( E_s \cdot d \cdot a + \frac{E_\theta \cdot (d-a)^2}{4} \right)}, \text{ м,} \quad (3)$$

где  $E_s, E_\theta$  – модули упругости первого рода для материала валика и детали, Па;  $t_n$  и  $t_k$  – температура нагрева материала покрытия и комнатная температура, °C;  $\alpha$  – температурный коэффициент линейного расширения, 1/°C;  $d$  – диаметр наплавляемого вала, м;  $a$  и  $b$  – меньшая и большая оси эллипса сечения наплавляемого валика, м.

Осеневая деформация заготовки при наплавке проволокой Св-08Х13  $\Delta_1 = 0,01151$  мм меньшая, чем при наплавке проволокой У7  $\Delta_2 = 0,01365$  мм. Определяющее влияние на деформации, а следовательно на остаточные напряжения, оказывает температура нагрева материала покрытия и ТКЛР. Меньшее влияние оказывает соотношение значений модуля упругости материалов покрытия и заготовки. Поэтому при выборе наплавочного материала следует отдавать предпочтение материалу с более низким значением ТКЛР, а нанесение покрытий вести с минимально возможным нагревом материала и сократить число наплавок шеек валов до двух в течение срока их службы.

Обоснованный выбор материала для наплавки повышает предел выносливости восстановленных валов, но при этом его значения остаются ниже на 16 – 20 % предела выносливости новых валов. Отрицательное влияние наплавки на структуру получаемых износостойких покрытий можно значительно снизить применением ППД. Влияние силы прижатия ролика к заготовке на толщину деформированного слоя приведено на рисунке 7, которая носит нелинейный характер.

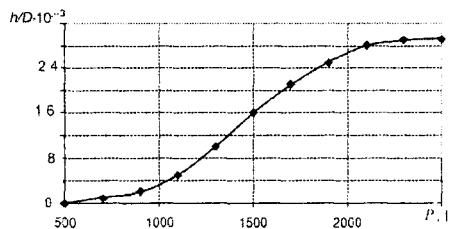
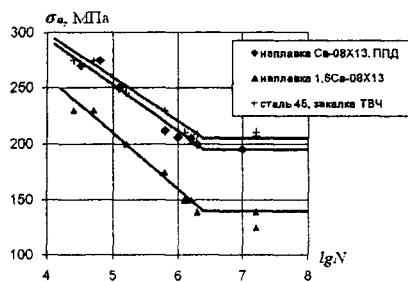


Рисунок 7 – Зависимость относительной глубины пластической деформации  $h/D$  от усилия прижатия обкаточного ролика  $P$

Упрочнение материала при деформировании объясняется тем, что дислокации концентрируются возле линий скольжения, а около дислокаций образуются поля напряжений, для дальнейшего распространения которых необходимо приложить большее усилие по сравнению с неупрочненным материалом. Изменение ориентации структурных составляющих вдоль обрабатываемой поверхности под влиянием контактного давления, препятствующее росту усталостных трещин, в основном радиально ориентированных, объясняет повышение усталостной прочности ППД, что подтверждается экспериментальными данными (рисунок 8).



$\sigma_a$  – амплитуда переменных напряжений;  
 $N$  – число циклов нагружения до разрушения образца

Рисунок 8 – Кривые усталости образцов: упрочненных закалкой ТВЧ, наплавленных без упрочнения, наплавленных с упрочнением ППД

При наплавке в покрытии возникают остаточные растягивающие напряжения, которые снижают усталостную прочность восстанавливаемой детали. В результате ППД в поверхностном слое наплавленного покрытия образуется текстура с повышенной концентрацией дефектов кристаллической решетки и напряжения меняют свой знак или значения, поэтому использование при восстановлении валов наплавки проволокой Св-08Х13 с последующим ППД обкаточным роликом повышает предел выносливости восстановленных валов на 25 – 30 % по сравнению с валами, восстановленными наплавкой без ППД, что приближает их усталостную прочность к усталостной прочности новых деталей.

**В четвертой главе** выполнена оптимизация режимов наплавки износостойкого покрытия с последующим ППД.

Наплавка хромистой сталью Св-08Х13 придает поверхностным слоям изделия высокую износостойкость. При низком содержании углерода хромистый наплавленный материал имеет мартенситно-ферритную структуру и твердость HRC 25 – 28. Наличие легирующих элементов значительно повышает остаточные напряжения в покрытии, а присутствие в нем карбидов является дополнительным источником возникновения усталостных трещин. Для того чтобы снизить разницу в ТКЛР материалов покрытия и основы, но при этом получить твердость 28 – 35 HRC, в качестве материала для наплавки ранее была опробована проволока из высокоуглеродистой стали У7. Однако наличие в таком покрытии высокого содержания углерода и, как следствие, его высокая твердость HRC 40 – 45 препятствуют дальнейшему повышению эксплуатационных свойств за счет ППД. Наплавка проволокой ПП-Нп-80Х20РЗТ обеспечила высокую износостойкость, но при этом предел выносливости восстановленной детали недопустимо снижается.

С учетом этих сведений из апробированных нами наплавочных материалов была выбрана проволока Св-08Х13 для обеспечения необходимых усталостной прочности и износостойкости валов, восстанавливаемых наплавкой с последующим ППД, за счет получения мартенситно-ферритной структуры, наиболее склонной к упрочнению.

Оптимизация режима наплавки покрытия и последующего ППД выполнена с использованием полного факторного эксперимента по методу крутого восхождения. Параметрами оптимизации были выбраны предел выносливости детали  $\sigma_{-1}$  и интенсивность изнашивания  $I_m$  покрытия. В качестве переменных факторов при наплавке и деформировании приняты: сила тока  $I$  ( $x_1$ ), скорость подачи проволоки  $v_{np}$  ( $x_2$ ), сила прижатия ролика к заготовке  $P$  ( $x_3$ ). Получены уравнения регрессии в кодированных переменных:

$$\sigma_{-1} = 161,875 + 5,375x_1 - 4,625x_2 + 21,875x_3 - 4,575x_1x_3, \quad (4)$$

$$I_m = 5,86 - 0,094x_2 - 0,231x_3. \quad (5)$$

Проверка значимости коэффициентов регрессии осуществлялась по критерию Стьюдента, расчет адекватности модели – по критерию Фишера. Коэффициент корреляции между  $\sigma_{-1}$  и  $I_m$  составляет –0,798.

Получены оптимальные режимы наплавки:  $I = 205$  А;  $v_{np} = 194$  м/ч;  $P = 2,9$  кН, обеспечивающие предел выносливости (при консольном нагружении) 205 МПа и интенсивность изнашивания материала покрытия  $5,5 \cdot 10^{-6}$  г/м.

**Глава 5. Промышленное использование и технико-экономическая оценка полученных результатов.** Для целей внедрения результатов работы в производство были разработаны технологические процессы восстановления коленчатых валов из высокопрочного чугуна ВЧ50 и стали 45.

Для оценки долговечности коленчатых валов и сравнения интенсивности изнашивания шеек, восстановленных с нанесением покрытий, и шеек без покрытий были подготовлены валы, у которых покрытия были нанесены на две коренные и две шатунные шейки, ближайшие к хвостовику. Остальные шейки были без покрытий. Валы прошли испытания в составе отремонтированных двигателей по 60-часовой программе согласно РК РБ 00918241.003-94 на обкаточно-тормозном стенде КИ-5543. Во время испытаний двигателей их останавливали, разбирали, осматривали коленчатые валы на предмет возникновения дефектов и измеряли износ шеек, затем двигатели собирали, а испытания продолжались. Для увеличения интенсивности изнашивания в масло добавляли абразив  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{SiO}_2$  зернистостью до 50 мкм содержанием 0,5 % по массе. Число циклов нагружения на обкаточном стенде во время испытаний составляло  $1,4 \cdot 10^7$  циклов, что сопоставимо с базовым числом циклов нагружения, равным  $10^7$ . Отсутствие трещин на восстановленных шейках валов после полного цикла испытаний позволяет судить об удовлетворительном соотношении усталости вала. Замеры значений линейного износа шеек проводились три раза (таблица). Интенсивность изнашивания шеек, восстановленных нанесением покрытий, не превышала интенсивности изнашивания шеек без покрытий.

#### Линейный износ шеек (мм на диаметр) коленчатых валов

№ замера	Чугунный вал двигателя ЗМЗ-53				Стальной вал двигателя ГАЗ-52			
	шатунные шейки		коренные шейки		шатунные шейки		коренные шейки	
	с покрытием	без покрытия	с покрытием	без покрытия	с покрытием	без покрытия	с покрытием	без покрытия
1	0,020	0,021	0,025	0,025	0,022	0,024	0,021	0,022
2	0,029	0,031	0,032	0,034	0,030	0,035	0,028	0,029
3	0,037	0,037	0,029	0,031	0,035	0,041	0,036	0,039

По разработанным технологическим процессам были восстановлены две партии коленчатых валов из высокопрочного чугуна и стали. Эти валы в

составе товарных двигателей направлены в эксплуатацию, сведения об их отказах не поступали.

Экономический эффект от внедрения технологических процессов восстановления коленчатых валов (1000 шт.) составляет: при восстановлении напылением – 3709771 руб.; при восстановлении наплавкой – 8041714 руб. При восстановлении валов из высокопрочного чугуна напылением эффект достигнут за счет снижения стоимости материала покрытий, при восстановлении стальных валов наплавкой – за счет исключения энергоемкого отжига.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты

1. Решена научная задача обеспечения эксплуатационных свойств восстанавливаемых валов, не уступающих свойствам новых деталей, нанесением покрытий с управлением составом и структурой материала путем обоснованного выбора исходного материала и оптимизации процессов нанесения покрытий и последующего ППД. Обеспечена интенсивность изнашивания шеек валов из высокопрочного чугуна  $4,1 \cdot 10^{-6}$  г/м и стальных валов –  $5,5 \cdot 10^{-6}$  г/м. Усталостная прочность стальных валов повышена на 25 – 30 % по сравнению с соответствующим показателем валов, восстановленных наплавкой без ППД [1, 5 – 7].

2. Повышение износстойкости материала покрытия восстановленных валов наплавкой в среде защитных газов [Ar + (20 – 30 %) CO<sub>2</sub>] проволокой Св-08Х13 с последующим упрочнением шеек ППД и усталостной прочности с коэффициентом корреляции этих свойств, равным –0,798, обеспечены за счет получения микроструктуры материала наплавленного покрытия, представляющей твердый раствор хрома и углерода в Fe<sub>a</sub> с мелкодисперсными включениями карбида хрома и содержанием углерода ≤ 0,08 % и преимущественной ориентации структурных составляющих в радиальном направлении. Наклеп, вызывающий выделение вторичных карбидов хрома и изменение ориентации структурных составляющих вдоль обрабатываемой поверхности, препятствует росту радиально ориентированных трещин и увеличивает твердость материала в 1,3 – 1,4 раза [12].

3. По результатам металлографических и фрактографических исследований установлен механизм образования усталостных трещин в восстановленной детали с наплавленным покрытием, согласно которому очаговая усталостная трещина возникает в переходной зоне между материалом покрытия и детали, ее края имеют следы участков с усталостными бороздками и фасетками межзеренного разрушения, а предел выносливости восстановленных валов определяется размерами этой зоны и структурой ее материала. При отношении микротвердости материала покрытия и детали более 1,6 и уменьшении

переходной зоны от 65 – 70 до 5 – 10 мкм предел выносливости повышается в 1,4 – 1,5 раза [4, 10, 11].

4. Оптимизация процесса наплавки стальных валов проволокой Св-08Х13 и последующего ППД, определяющая силу тока 205 А, скорость подачи наплавляемой проволоки 194 м/ч и силу прижатия ролика при обкатывании наплавленного покрытия после его обработки резанием, равную 2,9 кН, обеспечила повышение износостойкости шеек на 10 – 15 % и предел выносливости образцов 205 МПа [2, 3, 8, 13].

5. Предложена математическая зависимость осевой деформации наплавленного элемента детали, учитывающая модули упругости, температуру нагрева и ТКЛР материалов восстанавливаемого изделия и покрытия и размеры наносимого валика материала, которая позволяет определить уменьшение длины детали и прогнозировать возможность возникновения трещин в покрытии в зависимости от вида его материала и режимов нанесения и обоснованно сократить число наплавок шеек валов до двух в течение срока их службы [3, 7].

6. Валы, восстановленные с использованием результатов работы, выдержали испытания в интенсивном режиме по 60-часовой программе в составе отремонтированных двигателей. На ОАО Полоцкий завод «Проммашремонт» восстановлены две партии коленчатых валов: 1) из высокопрочного чугуна ВЧ-50 плазменным напылением смеси порошков: самофлюсующегося ПГ-10Н-01 (50 %), железного ПЖ-5М (30 %), медного ПМС-1 (10 %) и алюминиевого на основе никеля ПН85Ю15 (10 %); 2) из стали 45 с использованием дуговой наплавки в среде защитных газов проволокой Св-08Х13 с последующим ППД [11, 12, 14, 15].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Разработанные технологические процессы внедрены на ОАО Полоцкий завод «Проммашремонт», на котором были восстановлены партии коленчатых валов из высокопрочного чугуна ВЧ50 напылением и коленчатых валов из стали 45 дуговой наплавкой в среде защитных газов. Экономический эффект от внедрения технологических процессов и технологической оснастки при восстановлении партии из 1000 валов из высокопрочного чугуна составляет 3 709 771 руб., при восстановлении такой же партии стальных коленчатых валов – 8 041 714 руб. Результаты исследований могут быть использованы и на других ремонтных предприятиях Республики Беларусь при восстановлении валов.

Результаты диссертационной работы использованы в лекционных материалах и в лабораторных практикумах по курсам «Технологии и оборудование восстановления и упрочнения деталей машин и приборов» и «Основы повышения эксплуатационной стойкости поверхностей» при подготовке студентов по специальности 1-36 01 04.



## **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ**

### *Статьи в рецензируемых журналах и сборниках*

1. Константинов, В.М. Структура и свойства слоя, полученного плазменным оплавлением обмазки на поверхности чугунной детали / В.М. Константинов, В.И. Сороговец, Т.В. Вигерина // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки. – 2006. – № 12. – С. 83 – 88.
2. Иванов, В.П. Коэффициент термического расширения и внутренние напряжения материала покрытий из порошкового материала / В.П. Иванов, Т.В. Вигерина // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки. – 2007. – № 2. – С. 62 – 66.
3. Иванов, В.П. Повышение усталостной прочности валов, восстановляемых наплавкой в среде углекислого газа / В.П. Иванов, Т.В. Вигерина // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки. – 2008. – № 8. – С. 41 – 44.
4. Иванов, В.П. Технологическое обеспечение качества восстановленных деталей / В.П. Иванов, Т.В. Вигерина // Сб. науч. тр.; ГНУ ГОСНИТИ (Москва). – 2008. – Т. 101. – С. 138 – 140.
5. Иванов, В.П. Механизм разрушения валов с покрытиями, работающих в условиях циклического нагружения / В.П. Иванов, Т.В. Вигерина // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. Транспорт. – 2009. – № 3. – С. 30 – 36.

### *Статьи в научных сборниках и материалах конференций*

6. Вигерина, Т.В. Изучение особенностей обезуглероживания чугунной стружки во вращающемся контейнере / Т.В. Вигерина // Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения: сб. науч. тр.; под. общ. ред. С.А. Астапчика, П.А. Витязя. – Минск. Технопринт; Новополоцк: ПГУ, 2001. – С. 152 – 155.
7. Иванов, В.П. Повышение долговечности деталей двигателей внутреннего сгорания при их восстановлении / В.П. Иванов, Т.В. Вигерина // Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин: материалы VI междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 25 – 27 апреля 2007 г.: в 3-х т.; ПГУ. – Новополоцк, 2007. – Т. III. – С. 10 – 12.
8. Иванов, В.П. Управление коэффициентом термического расширения / В.П. Иванов, Т.В. Вигерина // Инженерия поверхности и реновация изделий: материалы 7-й междунар. науч.-техн. конф., Ялта, 29 – 31 мая 2007 г.; АТМУ. – Киев, 2007. – С. 78 – 81.
9. Вигерина, Т.В. Восстановление валов двигателей внутреннего сгорания / Т.В. Вигерина // Наука и инновации. Технологии: материалы III междунар.

науч.-практ. конф., София, 16 – 31 октября 2007 г. – София: «Бял ГРАД-БГ» ООД, 2007. – Т. 10: Технологии. – С. 38 – 40.

10. Иванов, В.П. Повышение усталостной прочности деталей при наплавке / В.П. Иванов, Т.В. Вигерина // *Inginerie agrara si transport auto: Lucrari stiintifice volumul 21*, Chisinau 2008. – С. 39 – 43.

11. Иванов, В.П. Усталостная прочность валов с покрытиями / В.П. Иванов, Т.В. Вигерина // Современные проблемы подготовки производства, заготовительного производства, обработки, сборки и ремонта в промышленности и на транспорте: материалы 9-го науч.-техн. семинара, Свалява. Карпаты, 23 – 27 февраля 2009 г.; АТМУ. – Киев, 2009. – С. 99 – 102.

12. Иванов, В.П. Повышение эффективности ремонтного производства / В.П. Иванов, Т.В. Вигерина // Опыт, проблемы и перспективы развития технического сервиса в АПК: докл. междунар. науч.-практ. конф., Минск, 15 – 18 апреля 2009 г.: в 2 ч.; БГАТУ. – Минск, 2009. – Ч. 1. – С. 162 – 168.

13. Вигерина, Т.В. Усталостная прочность и износстойкость валов восстановленных наплавкой / Т.В. Вигерина // Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин: сб. науч. тр. VII междунар. науч.-техн. конф., 29 – 30 апреля 2009 г.: в 3-х т.; ПГУ. – Новополоцк, 2009. – Т. III. – С. 223 – 226.

14. Иванов, В.П. Повышение качества восстановления коленчатых валов / В.П. Иванов, Т.В. Вигерина // Тракторы и автомобили: материалы VI междунар. науч.-практ. конф., Горки, 24 – 25 сентября 2009 г.; БСХА. – Горки, 2009. – С. 116 – 122.

15. Вигерина, Т.В. Повышение усталостной прочности валов, восстановленных наплавкой, поверхностным пластическим деформированием / Т.В. Вигерина // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 22 – 23 апреля 2010 г.: в 3 ч.; ГУ ВПО «Белорус.-Рос. ун-т». – Могилев, 2010. – Ч. 1. – С. 179 – 180.

16. Вигерина, Т.В. Повышение эксплуатационных свойств валов поверхностным пластическим деформированием / Т.В. Вигерина // Инженерия поверхностного слоя деталей машин: сб. материалов II междунар. науч.-практ. конф., 27 – 28 мая 2010 г.; БНТУ. – Минск, 2010. – С. 136 – 137.

### *Изобретения, патенты, заявки*

17. Устройство для восстановления наружных цилиндрических поверхностей: пат. 5408 Респ. Беларусь МПК (2006) В 23Р 6/00 / В.П. Иванов, Т.В. Вигерина; заявитель Полоцк. гос. ун-т. – и 20090008; заявл. 09.01.05; опубл. 09.04.15 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. – № 4. – С. 194.

## РЭЗЮМЭ

ВІГЕРЫНА Тацияна Уладзіміраўна

### Павышэнне эксплуатацыйных уласцівасцей аднаўляемых валаў шляхам кіравання саставам і структурай матэрыялаў пакрыццяў

**Ключавыя слова:** вал, аднаўленне, зносастойкасць, стомленасная трываласць, пакрыццё, дэфармаванне, састав, структура.

Мэта працы – павышэнне зносастойкасці і стомленаснай трываласці валаў шляхам кіравання хімічным саставам, структурай і ўласцівасцямі матэрыялаў пакрыццяў, якія наносяцца.

**Метады даследавання і апаратура.** Мікрацвёрдасць вымяралася на мікрацвердамерах ПМТ-3 і BUEHLER Model No 1105D; цвёрдасць пакрыццяў – метадамі Раквелла на прыборы ТК і Вікерса на прыборы IT2010-10; мікраструктура наплаўленага слоя вывучалася пры дапамозе мікраскопа Nicon Model і растравага электроннага мікраскопа LEO 1420; тэмпературны каэфіцыент лінейнага расшырэння матэрыялу пакрыцця вызначаўся тэнзаметрычным метадам; скажэнні крышталічнай рашоткі вызначаліся на дыфрактометры ДРОН-7; Інтэнсіўнасць зношвання адноўленых узоруў даследавалася на машыне трэння СМЦ-2; стомленасныя даследаванні праводзіліся на машыне УКІ-10М.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна.** Забяспечаны эксплуатацыйныя ўласцівасці адноўленых валаў, блізкія да ўласцівасцей новых дэталей. Выкарыстанне вынікаў забяспечыла павышэнне стомленаснай трываласці адноўленых валаў на 25 – 30 %, а інтэнсіўнасць зношвання адноўленых шыек – на ўзроўні інтэнсіўнасці зношвання шыек новых вырабаў. Вызначаны механізм утварэння стомленасных трэшчын у адноўленай дэталі з наплаўленым пакрыццём, які вызначае, што ачаговая стомленасная трэшчына ўзнікае ў пераходнай зоне пакрыцця і падложкі, а яе павелічэнне зніжае мяжу вынослівасці. Атрымана матэматычная залежнасць напружана-дэфармацийнага стану наплаўленага элемента дэталі. Аптымізаваны працэс наплаўкі і наступнай механічнай апрацоўкі загатоўкі згодна з крэтырыймі зносастойкасці і стомленаснай трываласці. Сканструявана і выраблена прыстасаванне для абкатвання галтей і цыліндрычных паверхняў наплаўленых шыек каленчатых валуў.

**Вынікі даследавання** ўкаранёны на ААТ Палацкі завод «Праммашрамонт» і ў навучальны працэс Палацкага дзяржаўнагауніверсітэта.

**Галіна выкарыстання.** Вынікі даследавання могуць быць выкарыстаны ў рамонтнай вытворчасці Рэспублікі Беларусь пры аднаўленні валаў агрэгатаў машын.

## РЕЗЮМЕ

ВИГЕРИНА Татьяна Владимировна

### Повышение эксплуатационных свойств восстанавливаемых валов путем управления составом и структурой материала покрытий

**Ключевые слова:** вал, восстановление, износостойкость, усталостная прочность, покрытие, деформирование, состав, структура.

**Цель работы** – повышение износостойкости и усталостной прочности восстанавливаемых валов путем управления химическим составом, структурой и свойствами материалов наносимых покрытий.

**Методы исследования и аппаратура.** Микротвердость измерялась на микротвердомерах ПМТ-3 и BUEHLER Model No 1105D; твердость покрытий – методами Роквелла на приборе ТК и Викерса – на приборе ИТ2010-10; микроструктура наплавленного слоя изучалась при помощи микроскопа Nicon Model и растрового электронного микроскопа LEO 1420. Температурный коэффициент линейного расширения материала покрытия определялся тензометрическим методом. Искажения кристаллической решетки определялись на дифрактометре ДРОН-7. Интенсивность изнашивания восстановленных образцов исследовалась на машине трения СМЦ-2. Усталостные испытания проводились на машине УКИ-10М.

**Полученные результаты и их новизна.** Обеспечены эксплуатационные свойства восстановленных валов, близкие к свойствам новых деталей. Использование результатов обеспечило повышение усталостной прочности восстановленных валов на 25 – 30 %, а интенсивность изнашивания восстановленных шеек – на уровне интенсивности изнашивания шеек новых изделий. Установлен механизм образования усталостных трещин в восстановленной детали с наплавленным покрытием, определяющий, что очаговая усталостная трещина возникает в переходной зоне покрытия и подложки и ее увеличение снижает предел выносливости. Получена зависимость осевой деформации наплавленного элемента детали, которая позволяет определить уменьшение ее длины. Оптимизирован процесс наплавки и последующей механической обработки заготовки по критериям износостойкости и усталостной прочности. Сконструировано и изготовлено приспособление для обкатывания галтелей и цилиндрических поверхностей наплавленных шеек коленчатых валов.

**Результаты исследования** внедрены на ОАО Полоцкий завод «Проммашремонт» и в учебный процесс Полоцкого государственного университета.

**Область применения.** Результаты исследований могут быть использованы в ремонтном производстве Республики Беларусь при восстановлении валов агрегатов машин.

## RESUME

VIGERINA Tatyana Vladimirovna

### Enhancement of operational properties of restored shafts by the management of compound and structure of a material of coverings

**Key words:** shaft, restoration, wear resistance, fatigue durability, a covering, deformation, compound, structure.

**Work purpose** – increase of wear resistance and fatigue durability of restored shafts by management of a chemical compound, structure and properties of materials applied to the coverings.

**Research methods and equipment.** Micro hardness was measured on micro durometer PMT-3 and BUEHLER Model No 1105D, hardness of coverings – by Rockwell's methods on device TK and on Vickers' device – IT2010-10, the microstructure of melted layer was studied by means of microscope Nicon Model and scanning electronic microscope LEO 1420. The temperature factor of linear expansion of a covering material was defined by a tensometric method. Distortions of a crystal lattice were defined on diffractometer DRON-7. Intensity of wear process of the restored samples was investigated on the tribometer SMC-2. Fatigue tests were carried out on UKI-10M machine.

**Achieved results and their novelty.** The operational properties of the restored shaft are provided very close to the properties of new details. Results application has provided increase of fatigue durability of the restored shaft by 25 – 30 %, and intensity of wear process of the restored necks to the level of intensity of wear process of necks of new products. The established mechanism of formation of fatigue cracks in the restored details with melted covering determined that focal fatigue crack arises in a transitive cover zone and substrate. Increase of focal fatigue crack reduces its endurance limit. There was received mathematical model of intense-deformation condition of melted element of the detail. There were optimised building-up process and subsequent mechanic processing of a billet by wear resistance and fatigue durability criteria. The device for running-in of a corner break and cylindrical surfaces of melted necks of cranked shaft was designed and manufactured.

**Results of the research** are implemented at PC «Prommashremont» in Polotsk and at educational process IE «PSU».

**Application area.** In Belarus results of the research can be used in repair activity at restoration of shaft units of machines.

Татьяна Владимировна  
ВИГЕРИНА

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ  
ВОССТАНДИВАЕМЫХ ВАЛОВ ПУТЕМ УПРАВЛЕНИЯ  
СОСТАВОМ И СТРУКТУРОЙ МАТЕРИАЛА ПОКРЫТИЙ

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.16.09 – Материаловедение (машиностроение)

Подписано в печать 23.12.2010. Формат 60×84. Бумага офсетная.

Ризография. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 1,16. Уч.-изд. л. 1,02. Тираж 60 экз. Заказ 2249.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
учреждение образования «Полоцкий государственный университет»

Лицензия ЛИ № 02330/0548568 от 26.06.09 г.

Лицензия ЛП № 02330/0494256 от 27.05.09 г.

211440, г. Новополоцк, ул. Блохина, 29