

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 621.693

**ВИГЕРИНА**  
**Татьяна Владимировна**

**ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ КОЛЕНЧАТЫХ ВАЛОВ  
ДВИГАТЕЛЕЙ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА  
И КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ НАПЫЛЕНИЕМ, НАПЛАВКОЙ  
И ПОВЕРХНОСТНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ**

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальности  
05.02.08 – Технология машиностроения

Минск, 2013

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: **Девойно Олег Георгиевич**,  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий НИИЛ плазменных и лазерных  
технологий НИЧ Белорусского национального  
технического университета;

**Белоцерковский Марат Артемович**,  
доктор 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 25 октября 2013 г. в 14<sup>00</sup> часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.03 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, проспект Независимости, 65, корп. 1, ауд. 202, тел. ученого секретаря 292-24-04.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан 20 сентября 2013 г.

Ученый секретарь  
совета по защите диссертаций,  
доктор технических наук, профессор

О.Г. Девойно

© Вигерина Т.В., 2013

© Белорусский национальный  
технический университет, 2013

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие науки и техники предполагает повышение надежности машин с увеличением ресурса их деталей. В настоящее время капитального ремонта требуют около 45–50 тысяч двигателей грузовых автомобилей. Их низкий послеремонтный ресурс (40–50 % от нормативного) обусловлен неудовлетворительным качеством восстановления основных деталей: блоков и гильз цилиндров, коленчатых валов и шатунов. Коленчатые валы – самые сложные и дорогостоящие детали класса «вал». Их стоимость составляет 10–25 % стоимости двигателя, а по достижению предельного состояния выбраковывают около 20 % валов. Технологии восстановления коленчатых валов нанесением покрытий в основном ориентированы на обеспечение износостойкости шеек, но при этом усталостная прочность снижается на 25–30 %, а ресурс уступает нормативному. Для восстановления чугунных коленчатых валов чаще используют напыление, а основным напыляемым материалом являются хромоникелевые порошки, обеспечивающие требуемые эксплуатационные характеристики, но при этом отличающиеся высокой стоимостью. Поэтому одной из задач данной работы являлось исследование влияния химического состава наплавляемой порошковой смеси, включающей порошки: железа, никель-алюминиевого и меди и изучение непосредственного влияния меди на физико-механические свойства покрытий и разработка технологии восстановления чугунных коленчатых валов напылением смесью порошков, обеспечивающих требуемый нормативный ресурс.

Для восстановления стальных коленчатых валов во многих случаях используют наплавку, как более производительный способ восстановления. За счет больших тепловложений при реализации этого способа происходит изменение осевых размеров вала, что впоследствии приводит к усложнению сборки отремонтированных двигателей. В настоящее время факторы оказывающие влияние на величину осевой деформации наплавляемых валов остаются малоизученными.

Таким образом, установление зависимости величины осевой деформации наплавленного элемента детали от физико-механических свойств наплавляемого материала и параметров наплавки, позволяющей прогнозировать величину осевой деформации, обоснованно выбрать материал и разработать технологический процесс восстановления стальных коленчатых валов наплавкой с доведением их геометрических параметров и эксплуатационных характеристик до показателей новых деталей, который может быть использован для ремонта техники в Республике Беларусь.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами** Работа выполнена в рамках внутривузовской научно-исследовательской темы «Создание теоретических и технологических основ восстановления деталей, диагностирования сварных объектов, обработка диффузионно-легированных порошков, различных покрытий композиционных материалов из них» (ГБ № 5426, 2005–10 годы).

**Цель и задачи исследования** Цель работы – разработка технологий восстановления коленчатых валов из высокопрочного чугуна и конструкционной стали напылением и наплавкой с последующим поверхностным пластическим деформированием, обеспечивающих их нормативный послеремонтный ресурс.

Для достижения цели потребовалось решение следующих задач:

– изучить условия работы чугунных и стальных коленчатых валов, материалы и технологии их восстановления с обеспечением требуемых эксплуатационных характеристик;

– исследовать влияние химического и гранулометрического состава порошкового материала и режимов его напыления на физико-механические и эксплуатационные характеристики покрытий на шейках коленчатых валов из высокопрочного чугуна;

– выявить особенности механизма разрушения валов с наплавленными покрытиями и установить зависимость величины осевой деформации наплавленного элемента детали от физико-механических свойств наносимого материала;

– исследовать влияние режимов напыления и наплавки с последующим поверхностным пластическим деформированием и состава наносимого материала на структуру покрытий и свойства чугунных и стальных коленчатых валов;

– разработать и внедрить технологические процессы восстановления коленчатых валов из чугуна и конструкционной стали, обеспечивающих их нормативный послеремонтный ресурс.

*Объект исследований* – чугунные и стальные коленчатые валы и покрытия, наносимые на их шейки при восстановлении. *Предмет исследования* – технологии восстановления чугунных и стальных коленчатых валов, обеспечивающие их нормативный послеремонтный ресурс.

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

1. Результаты экспериментальных исследований влияния состава порошковой смеси, используемой для напыления коленчатых валов из высокопрочного чугуна, на температурный коэффициент линейного расширения, напряжения второго рода и интенсивность изнашивания материала покрытия, уста-

навливающие оптимальное содержание порошка меди в нем и параметры технологического процесса восстановления валов, обеспечивающие их требуемые эксплуатационные характеристики.

2. Теоретическая зависимость величины осевой деформации элементов стального коленчатого вала, возникающей при наплавке, от модуля упругости и температурного коэффициента линейного расширения материалов детали и покрытия, температуры нагрева материала покрытия и размеров наплавленных валиков, позволяющая прогнозировать изменение длины коленчатого вала после каждой наплавки и обоснованно ограничить их количество.

3. Экспериментальные зависимости износо- и усталостной стойкости восстановленных наплавкой стальных коленчатых валов от химического состава наплавляемой проволоки, режимов ее нанесения и последующей обработки, позволившие обосновать режимы наплавки, обеспечивающие оптимальную с точки зрения износо- и усталостных характеристик структуру покрытия.

4. Результаты экспериментальных исследований механизма усталостного разрушения стальных коленчатых валов восстановленных наплавкой проволокой различного химического состава, что позволило установить влияние свойств и размеров переходной зоны между покрытием и основой на усталостную прочность и характер излома деталей, и обеспечить предел выносливости восстановленных валов на уровне новых изделий.

#### **Личный вклад соискателя**

При подготовке диссертационной работы соискателем лично решены следующие задачи:

1. Проведены экспериментальные исследования микроструктуры и эксплуатационных характеристик, восстановленных напылением и наплавкой чугуновых и стальных коленчатых валов, соответственно.

2. Получена теоретическая зависимость величины осевого деформирования от физико-механических свойств наносимого материала.

3. Разработаны рекомендации по выбору оптимальных режимов и материалов при восстановлении чугуновых и стальных коленчатых валов напылением и наплавкой, обеспечивающие их нормативный послеремонтный ресурс.

4. Разработаны технологические процессы восстановления коленчатых валов из высокопрочного чугуна и конструкционной стали.

Профессор Иванов В.П. принимал участие в выборе научно-технического направления и определении задач исследования, оказывал консультационную и практическую помощь на всех этапах выполнения работы. Кастрюк А.П. участвовал в обсуждении результатов, Штемпель О.П. и Фруцкий В.А. оказывали практическое содействие при металлографическом анализе шлифов получаемых покрытий, Кравченко Н.Л. оказывал содействие при выполнении экспериментальных исследований.

### **Апробация результатов диссертации**

Основные результаты исследований доложены и обсуждены: на междунар. науч.-техн. конф. «Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин» (Новополоцк, ПГУ, 2007, 2009 г.); 7-й междунар. науч.-техн. конф. «Инженерия поверхности и реновация изделий» (Ялта, АТМУ, 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, 2009 г.); междунар. науч.-практ. конф. «Опыт, проблемы и перспективы развития технического сервиса в АПК» (Минск, БГАТУ, 2009 г.); VI междунар. науч.-практ. конф. «Тракторы и автомобили» (Горки, БСХА, 2009 г.); междунар. науч.-практ. конф. «Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве» (Минск, НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства, 2009 г.); междунар. науч.-техн. конф. «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии» (Могилев, Белорус.-Рос. ун-т, 2010 г.); II междунар. науч.-практ. конф. «Инженерия поверхностного слоя деталей машин» (Минск, БНТУ, 2010 г.); междунар. науч.-техн. конф. «Инновационные технологии в машиностроении» (Новополоцк, ПГУ, 2011 г.).

### **Опубликованность результатов диссертации**

Основные результаты исследований опубликованы в 29 научных работах объемом 9,5 авторских листа, в том числе одной монографии, 14 статьях в рецензируемых изданиях, 14 статьях в научных сборниках и в материалах конференций. Имеются один патент Республики Беларусь на изобретение и два патента на полезные модели. Общий объем опубликованных печатных работ – 218 страниц.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из перечня принятых условных обозначений, введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, библиографического списка и приложений. Работа изложена на 209 страницах машинописного текста, включает 63 рисунка на 32 страницах, 20 таблиц на 20 страницах, список использованных источников в количестве 197 наименований на 16 страницах, список публикаций соискателя в количестве 32 наименований на 3 страницах и 21 приложение на 40 страницах.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, определены цель исследований и научная задача работы, направленная на повышение качества восстановления коленчатых валов, определяемого их усталостной прочностью и износостойкостью шеек.

**В первой главе** рассмотрены условия работы коленчатых валов двигателей под действием комбинированных циклических нагрузок, вызывающих накопление усталостных повреждений и изнашивание шеек.

Около 65 % коленчатых валов изготавливают из высокопрочного чугуна и среднеуглеродистой стали, поэтому для изготовления образцов при проведении экспериментов использовали сталь 45 и высокопрочный чугун ВЧ50. Технологические процессы, предполагающие восстановление изношенных валов путем нанесения покрытий на их шейки, отличаются от процессов изготовления деталей необходимостью получения ремонтных заготовок, в т.ч. нанесением покрытий и особенностями обработки. Выбор технологических баз при обработке резанием восстанавливаемой детали отличается от соответствующей процедуры при обработке заготовок из поковок и отливок. Большинство работ по теории усталостной прочности рассматривают детали без покрытий, однако закономерности, характерные для механизма их усталостного разрушения, требуют уточнения при переходе к механизму усталостного разрушения деталей с покрытиями.

В части получения высоких эксплуатационных характеристик восстановленных валов важную роль играют микроструктура покрытия и ее свойства на поверхности и в зоне соединения с основным материалом. Оптимальной в данном случае является гетерогенная структура, состоящая из матрицы и карбидов, содержание которых регулируется наличием и соотношением легирующих элементов. На формирование типа карбидов значительное влияние оказывает соотношение хрома и углерода, а на формирование свойств матрицы – содержание никеля и марганца, но высоколегированные материалы аустенитного класса дорогостоящие, поэтому в одну из задач исследования входил выбор недорогого наплавочного материала, обеспечивающего при наплавке требуемые эксплуатационные характеристики.

Наибольшее применение при получении ремонтных заготовок нашли наплавка (60–80 %) и напыление (6–12 %). Износостойкость и усталостную прочность наплавленных покрытий можно значительно повысить, применяя после наплавки поверхностное пластическое деформирование с помощью оснастки, формирующей благоприятную текстуру покрытия. В большинстве случаев повышение износостойкости за счет наплавки высокоуглеродистого легированного материала приводит к снижению предела выносливости восстанавливаемых деталей. Дополнительно к определению износостойкости и усталостной прочности деталей проведено комплексное изучение их износоусталостной стойкости.

Анализ процессов восстановления коленчатых валов показал, что часть из них содержит энергоемкие операции, другая часть повышает износостойкость, но при этом снижается усталостная прочность. Для решения этой проблемы

часто используется дорогостоящее оборудование или материалы, что не всегда оправдано в ремонтном производстве. Так же малоизученными являются физико-механические свойства покрытий, оказывающее непосредственное влияние на эксплуатационные характеристики восстановленных валов. На основании проведенного анализа выявлены основные направления исследований, требующие дальнейшего развития, сформулированы цель и задачи исследований.

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

Для плазменного напыления смеси порошков на шейки валов применялась установка УПУ-3Д. Наплавку коленчатых валов в среде защитных газов вели на стенде заводской конструкции ОАО «Проммашремонт» с источником питания ВС-300.

Микротвердость структурных составляющих покрытий исследовали на микротвердомерах ПМТ-3 и BUEHLER Model No 1105D. Твердость покрытий исследовали методом Роквелла (ГОСТ 9013) на приборе ТК и методом Виккерса (ГОСТ 9450) на приборе ИТ2010-10. Микроструктуру наплавленного покрытия изучали на микрошлифах при помощи металлографического микроскопа Nikon Model Epihot 200 при увеличениях  $\times 100$ ,  $\times 200$  и  $\times 500$ . Изломы наплавленных образцов исследовали с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) LEO 1420 при увеличении  $\times 8000$ – $15000$ . Температурный коэффициент линейного расширения материала покрытия определяли тензометрическим методом. Рентгеноструктурный фазовый анализ, определение плотности дислокаций и искажений кристаллической решетки материала покрытий выполняли на дифрактометре ДРОН-3 в  $\text{CuK}_\alpha$  монохроматизированном излучении. Для измерения шероховатости и записи профиля поверхностей изделий использовали профилограф-профилометр АБРИС-ПМ7 ГОСТ 2789-73.

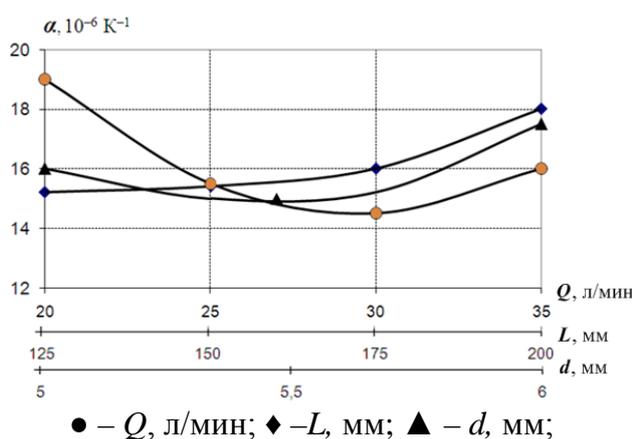
Интенсивность изнашивания образцов с покрытиями исследовали на машине трения СМЦ-2 по схеме «диск – колодка» (материал вкладышей подшипников скольжения АО20-1. Усталостные испытания проводились на машине УКИ-10М. Износоусталостные испытания проводили на модернизированной установке УКИ-10М. Поверхностное деформирование выполняли с помощью специально сконструированного приспособления.

Обработку экспериментальных данных проводили методами математической статистики при помощи пакетов программ Excel и Statistica. Исследование режимов наплавки и последующего поверхностного пластического де-

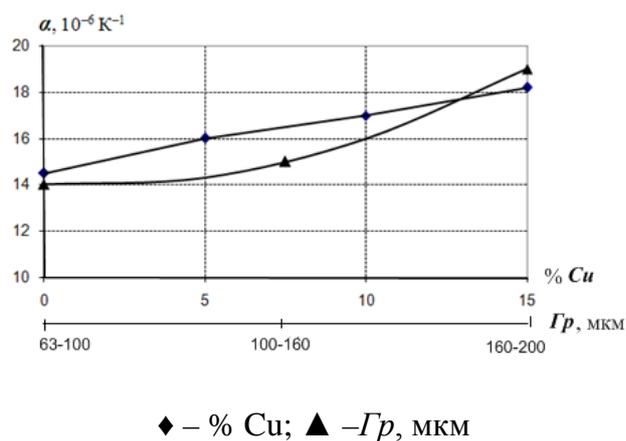
формирования проводилась с использованием планирования экспериментов и оптимизации по методу крутого восхождения.

**Третья глава** содержит анализ технического состояния коленчатых валов, поступивших в ремонт, и результаты экспериментальных исследований режимов напыления покрытий, механизма осевого деформирования коленчатого вала при наплавке, обоснование выбора материала покрытий и условий повышения их износостойкости и усталостной прочности валов.

С целью снижения стоимости материала при восстановлении чугуновых коленчатых валов самофлюсующимся хромоникелевым порошком ПГ-10Н-01 было предложено ввести порошок железа ПЖ-5М, а требуемые эксплуатационные характеристики введением в напыляемую смесь порошка меди ПМС-1. Для повышения качества покрытия вводили никель-алюминиевый порошок ПТ-НА-01. Изменение состава материала (изменением доли порошков ПМС-1 и ПТ-НА-01) и режимов его нанесения влияет на температурный коэффициент линейного расширения и внутренние напряжения второго рода в нем (рисунки 1 и 2). При напылении покрытия использовали следующие режимы (сила тока  $I = 250\text{--}350$  А, расход плазмообразующего газа  $Q = 20\text{--}35$  л/мин, расстояние от сопла до детали,  $L = 125\text{--}200$  мм, гранулометрический состав  $Гр = 63\text{--}200$  мкм, диаметр сопла  $d = 5\text{--}6$  мм, процентное содержание меди  $Сu = 0\text{--}15$  %). Наибольшее влияние на изменение температурного коэффициента линейного расширения материала покрытия оказывают процентное содержание меди в исходной композиции порошка, диаметр сопла и гранулометрический состав порошка.



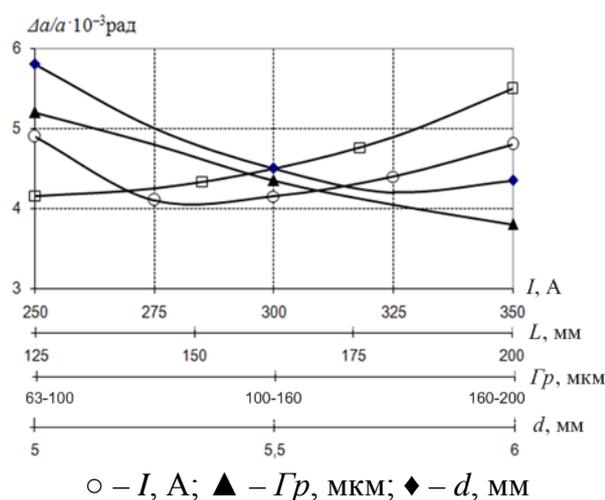
**Рисунок 1 – Зависимость температурного коэффициента линейного расширения  $\alpha$  материала покрытия от режима напыления чугуновых валов**



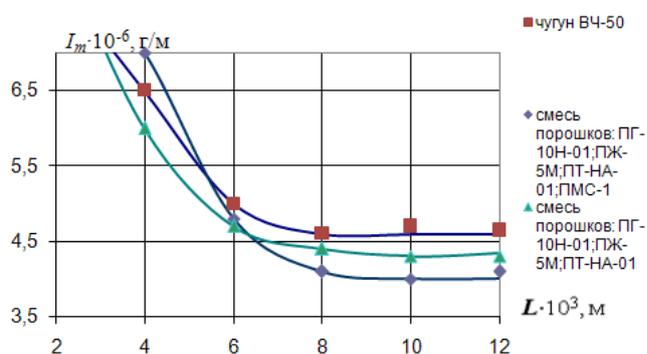
**Рисунок 2 – Зависимость температурного коэффициента линейного расширения  $\alpha$  материала покрытия от характеристик порошка при напылении чугуновых валов**

Графические зависимости величины искажений кристаллической решетки от наиболее значимых факторов процесса приведены на рисунке 3. Наибольшее влияние на изменение внутренних напряжений второго рода в частицах покрытия оказывают сила тока плазменной дуги и гранулометрический состав частиц порошка.

С учетом полученных графических зависимостей был назначен режим напыления: сила тока 315–335 А, напряжение 70–80 В, расход плазмообразующего газа ~ 30 л/мин, расстояние от сопла до заготовки 148–152 мм, диаметр сопла 5,5 мм и исходный состав материала покрытия из порошков: ПГ-10Н-01 (48–52 %), железного ПЖ-5М (28–32 %), медного ПМС-1 (9–11 %), никель-алюминиевого ПТ-НА-01 (9–11 %) (патент Республики Беларусь на изобретение № 16657). Использование приведенного материала позволило получить интенсивность изнашивания покрытия на 5–7% ниже интенсивности изнашивания покрытия без меди (рисунок 4).



**Рисунок 3 – Зависимость величины искажений кристаллической решетки  $\Delta a/a$  железа в покрытии от режима напыления на чугунные валы и характеристик порошка**



**Рисунок 4 – Интенсивность изнашивания напыленных образцов из чугуна  $I_m$  без покрытия и с покрытиями различного химического состава в зависимости от пути трения  $L$**

При восстановлении стальных коленчатых валов наплавкой нанесение покрытий сопровождается большими тепловложениями в заготовку и уменьшает длину восстанавливаемого коленчатого вала из-за неодновременного и неравномерного нагрева и охлаждения участков детали и покрытия. Длина коленчатого вала после нескольких наплавки уменьшается до 3 мм за счет действия внутренних напряжений в материале покрытия и детали.

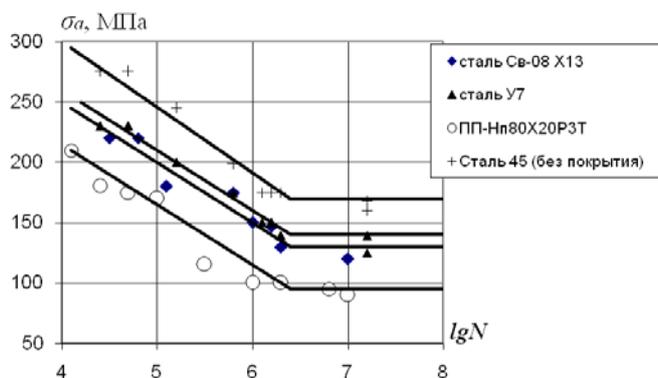
С учетом условия, что материал валика в направлении оси детали будет растянут под действием силы  $P_{pc} = \pi \cdot a \cdot d \cdot (t_n - t_k) \cdot \alpha \cdot E_\sigma$ , а материал шейки детали под валиком – сжат под действием силы  $P_{сж} = \frac{\Delta}{b} \cdot E_\sigma \cdot \frac{\pi \cdot (d - a)^2}{4}$ , была составлена система уравнений, решение которой позволило рассчитать осевую деформацию  $\Delta$ :

$$\Delta = \frac{E_\sigma \cdot a \cdot b \cdot d \cdot \alpha \cdot (t_n - t_k)}{\left( E_\sigma \cdot a \cdot d + \frac{E_\sigma \cdot (d - a)^2}{4} \right)}, \text{ м}, \quad (1)$$

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

Расчетная осевая деформация при наплавке одного валика покрытия проволокой Св-08Х13, равная 0,01151 мм, меньше аналогичного показателя при наплавке проволокой У7, равного 0,01365 мм. Определяющее влияние на деформацию, а следовательно и на остаточные напряжения, оказывает температура нагрева материала покрытия и температурный коэффициент линейного расширения. Меньшее влияние оказывает соотношение значений модуля упругости материалов покрытия и заготовки. Следовательно, при выборе наплавочного материала следует отдавать предпочтение материалу с более низким значением температурного коэффициента линейного расширения, а нанесение покрытий вести с минимально возможным нагревом материала, а число наплавов шеек коленчатых валов ограничить двумя в течение срока их службы. Для того чтобы снизить разницу в температурных коэффициентах линейного расширения материалов покрытия и основы в качестве материала покрытия, была опробована проволока из высокоуглеродистой стали У7. Однако большое содержание углерода и, как следствие, высокая твердость покрытия 40–45 НРС препятствовали дальнейшему повышению его эксплуатационных характеристик за счет поверхностного пластического деформирования. Наплавка проволокой ПП-Нп-80Х20Р3Т обеспечила высокую износостойкость, но при этом предел выносливости восстановленной детали оказался недопустимо низким. Наплавка проволокой Св-08Х13 придала поверхностным слоям изделия требуемую износостойкость за счет того, что при низком содержании углерода наплавленный материал имел мартенситно-ферритную структуру твердостью 25–28 НРС с мелкодисперсными включениями карбидов хрома,

которая хорошо упрочняется (твердость после поверхностного пластического деформирования повысилась в 1,3–1,4 раза).

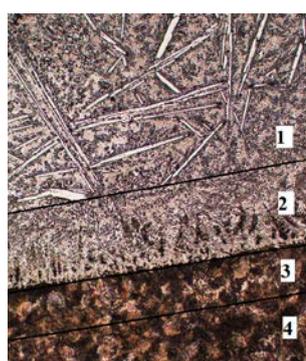


$\sigma_a$  – амплитуда переменных напряжений;  
 $N$  – число циклов нагружения до разрушения образца

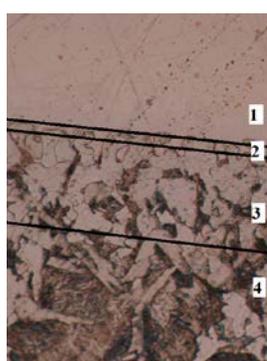
**Рисунок 5 – Кривые усталости образцов из стали 45 с наплавленными покрытиями**

переходных зон на образцах наплавленных проволоками У7 и Св-08Х13 минимальны 5–10 мкм (рисунок 6 б, в), усталостная прочность значительно выше (рисунок 5) и характеризуются низкими значениями микротвердости 1500–2600 МПа. Уменьшение переходной зоны с 65–70 до 10–15 мкм при отношении микротвердости материала покрытия и детали менее 1,5–1,6 раза повышает предел выносливости в 1,4–1,5 раза.

Анализ кривых усталостной прочности образцов, наплавленных проволоками различного химического состава (рисунок 5), и изучение микроструктуры наплавленных покрытий (рисунок 6 а) показали, что максимальные размеры переходной зоны 65–70 мкм получены при наплавке проволокой ПП-Нп-80Х20Р3Т, но предел выносливости этих образцов минимален (рисунок 5), а микроструктура характеризуется значительным градиентом микротвердости от 8750 до 14000 МПа (в 1,6 раза). Размеры



а)  $\times 100$



б)  $\times 500$



в)  $\times 100$

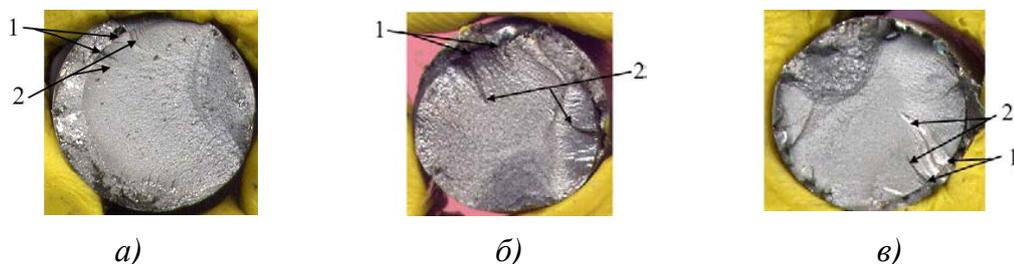
а) ПП-Нп-80Х20Р3Т; б) Св08Х13; в) У7

1 – покрытие; 2– переходная зона; 3 – зона термического влияния, 4 – основа

**Рисунок 6 – Микроструктура наплавленного покрытия из проволоки**

**В четвертой главе** исследован механизм разрушения образцов с покрытиями и выполнена оптимизация режимов наплавки износостойкого покрытия с последующим поверхностным пластическим деформированием.

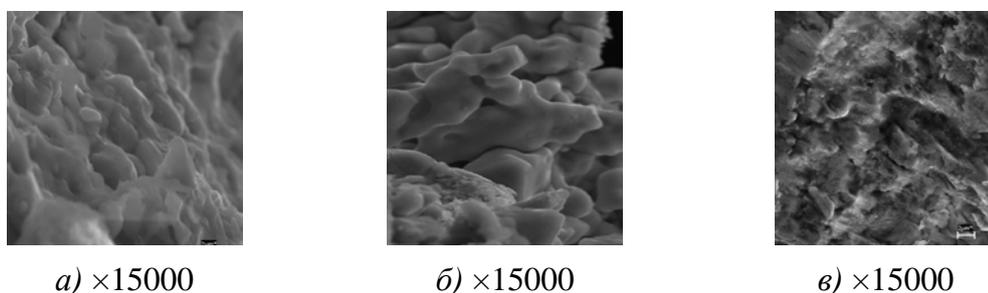
Усталостные трещины зарождаются в переходной зоне 1, затем развиваются вглубь образца или детали, образуя острые надрезы 2 (рисунок 7) до тех пор, пока действующие в сечении напряжения достигнут разрушающих.



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

**Рисунок 7 – Поверхности усталостного излома образцов из стали 45, наплавленных проволокой**

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 8). На поверхности излома в зависимости от амплитуды напряжений можно выделить несколько характерных зон: зону чисто усталостного разрушения (рисунок 8, *a*); переходную зону (рисунок 8, *б*), характеризующуюся признаками смешанного перехода, в которой наблюдается ямочное разрушение; зону долома (рисунок 8, *в*), имеющую более гладкий волнообразный рельеф. Трещины зарождаются в переходной зоне, их края имеют следы усталостных бороздок и фасетки межзеренного разрушения.



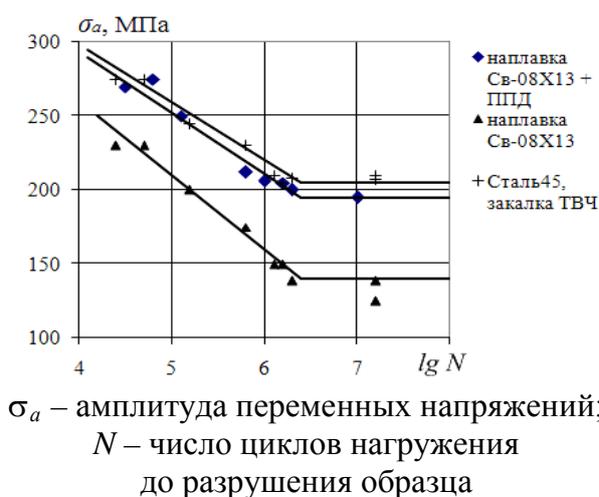
*a* – покрытие; *б* – переходная зона; *в* – основа

**Рисунок 8 – Микрорельеф поверхности усталостного излома образца, наплавленного проволокой Св-08Х13**

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

Уменьшение интенсивности изнашивания наплавленного материала из проволоки Св-08Х13 и повышение предела выносливости восстановленной детали обеспечено за счет получения ферритно-мартенситной микроструктуры с мелкодисперсными включениями хрома. При обкатывании преимущественная ориентация кристаллитов из радиального направления изменяется на ориентацию перпендикулярно образующей шейки или галтели, что с увеличением плотности дислокаций с  $0,566 \cdot 10^7$  до  $0,711 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$  препятствует росту усталостных трещин, первоначально ориентированных в радиальном направлении. Использование для наплавки валов проволоки Св-08Х13 с последующей упрочняющей обработкой обкаточным роликом повышает предел выносливости деталей на 25–30 % по сравнению с валами, восстановленными наплавкой без поверхностного пластического деформирования, что приближает их усталостную прочность к одноименному показателю новых деталей (рисунок 9).

Сравнение профилограмм шероховатости поверхностей обработанных в следующей последовательности: шлифование + полирование и шлифование + поверхностное пластическое деформирование + полирование показало, что благоприятный микропрофиль неровностей обеспечивает поверхностное пластическое деформирование с последующим полированием обкатанной поверхности.



**Рисунок 9 – Кривые усталости образцов: упрочненных закалкой ТВЧ, наплавленных без упрочнения, наплавленных с упрочнением ППД**

В ходе экспериментальных исследований было установлено, что при восстановлении стальных коленчатых валов требуется уточнение технологических режимов процесса наплавки и последующей упрочняющей обработки. В этой связи был проведен ряд экспериментов при восстановлении стальных коленчатых валов наплавкой с последующим поверхностным пластическим деформированием в соответствии с построенной матрицей планирования Далее

была выполнена оптимизация по методу крутого восхождения.

В качестве параметров 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:

$$\sigma_{-1} = 161,875 + 5,375x_1 - 4,625x_2 + 21,875x_3 - 4,575x_1x_3, \quad (2)$$

$$I_m = 5,86 - 0,094x_2 - 0,231x_3. \quad (3)$$

Коэффициент корреляции между  $\sigma_{-1}$  и  $I_m$  составляет  $(-0,798)$ .

Оптимальные режимы наплавки и поверхностного пластического деформирования ( $I = 200\text{--}210$  А,  $v_{np} = 192\text{--}196$  м/ч,  $P = 2,85\text{--}2,95$  кН), обеспечивающие предел выносливости на уровне предела выносливости новых стальных коленчатых валов и интенсивность изнашивания материала покрытия на 6–8 % ниже интенсивности изнашивания новых изделий.

**В пятой главе** разработаны технологические процессы восстановления коленчатых валов из высокопрочного чугуна и конструкционной стали с выбором технологических баз при обработке резанием ремонтных заготовок, их промышленное использование и технико-экономическая оценка полученных результатов.

Процесс восстановления коленчатых валов включает следующие основные операции: очистка, дефектация, предварительная подготовка поверхности деталей к нанесению покрытий, наплавка или напыление покрытий, механическая обработка, контроль качества покрытия и восстановленной детали.

Для оценки долговечности коленчатых валов и сравнения интенсивности изнашивания шеек, восстановленных с нанесением покрытий, и шеек без покрытий были подготовлены стальной и чугунный валы, у которых покрытия были нанесены на две коренные и две шатунные шейки, ближайшие к хвостовику. Остальные шейки были без покрытий. Валы в составе отремонтированных бензиновых двигателей прошли ускоренные испытания по 60-часовой программе на обкаточно-тормозном стенде КИ-5543 согласно РК РБ 00918241.003-94 и РК РБ 00918241.017-98. Во время испытаний двигатели останавливали, разбирали, осматривали коленчатые валы на предмет возникновения дефектов и определяли износ шеек и вкладышей, затем двигатели собирали, а испытания продолжались. Для увеличения интенсивности изнашивания в масло добавляли абразив  $Al_2O_3$  и  $SiO_2$  размером зерна до 50 мкм содержанием 0,3 % по массе. Число циклов нагружения коленчатых валов на обкаточном стенде во время испытаний составляло  $\sim 1,4 \cdot 10^7$  циклов, что сопоставимо с базовым числом циклов нагружения, равным  $10^7$ . Отсутствие

трещин на восстановленных шейках после полного цикла испытаний позволило судить об удовлетворительном сопротивлении усталости валов. Измерения линейного износа шеек проводились три раза (таблица 1).

Таблица 1 – Линейный износ шеек и вкладышей (мм на диаметр) КВ в процессе испытаний

№ замера	Чугунный КВ двигателя ЗМЗ-53				Стальной КВ двигателя ГАЗ-52-04			
	шатунные шейки		коренные шейки		шатунные шейки		коренные шейки	
	вкладыш		вкладыш		вкладыш		вкладыш	
	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	0,023	0,024	0,021	0,022
	0,086	0,081	0,081	0,082	0,090	0,094	0,092	0,092
2	0,029	0,031	0,030	0,031	0,033	0,035	0,028	0,029
	0,089	0,084	0,084	0,083	0,093	0,097	0,094	0,095
3	0,037	0,037	0,033	0,032	0,037	0,041	0,036	0,039
	0,086	0,090	0,085	0,086	0,094	0,098	0,095	0,097

Интенсивность изнашивания шеек чугунных коленчатых валов восстановленных напылением не более интенсивности изнашивания шеек без покрытия, а для вкладышей, работающих с ними в паре трения, она снизилась на 1–4%. Интенсивность изнашивания шеек стальных коленчатых валов восстановленных наплавкой снизилась на 6–8 %, вкладышей – на 2–4 %.

На ОАО Полоцкий завод «Проммашремонт» были восстановлены две партии коленчатых валов из высокопрочного чугуна и конструкционной стали с использованием разработанных технологических процессов. Для оценки послеремонтной наработки бензиновых двигателей с восстановленными коленчатыми валами они прошли промышленные испытания на грузовых автомобилях транспортно-хозяйственного цеха ОАО Полоцкий завод «Проммашремонт» и Полоцкого хлебозавода.

Послеремонтный ресурс двигателей с восстановленными валами не уступал нормативному. На ОАО «Верхнедвинский райагросервис» проведена оценка возможности использования результатов диссертационных исследований для восстановления коленчатых валов дизельных двигателей Д-240 и Д-245.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. В результате экспериментальных исследований состава порошкового покрытия и параметров его напыления при восстановлении чугунных колен-

чатых валов на температурный коэффициент линейного расширения, напряжения второго рода и, как следствие, износостойкость материала покрытия установлено, что напыление смеси порошков: самофлюсующегося ПГ-10Н-01 (48-52 %), железного ПЖ-5М (28-32 %), медного ПМС-1 (9-11 %) и никель-алюминиевого ПТ-НА-01 (9-11 %) по следующему режиму: сила тока 315-335 А, напряжение на плазмотроне 70-80 В, расход плазмообразующего газа 30 л/мин; расстояние от сопла до заготовки 148-152 мм; диаметр сопла 5,5 мм, снижает интенсивность изнашивания шеек на 5-7 % по сравнению с интенсивностью изнашивания материала покрытия без меди [3, 15, 18, 32].

2. В ходе теоретических исследований процесса восстановления стальных коленчатых валов наплавкой проволокой, получена зависимость величины осевой деформации элементов вала от модуля упругости, температуры нагрева и температурного коэффициента линейного расширения материалов восстанавливаемого изделия и покрытия, размеров наплавленного валика, на основании которой установлено, что число наплавов не должно превышать двух в течение срока службы детали, что подтверждено и практическими исследованиями [2, 3, 7, 12, 14, 15].

3. Исследования влияния химического состава наплавленного материала и режимов его нанесения на структуру покрытий стальных коленчатых валов установлено, что максимальная износостойкость и минимальный уровень остаточных напряжений достигается при наплавке в среде защитных газов [Ar + (20-30 %) CO<sub>2</sub>] проволокой Св-08Х13 с последующим упрочнением шеек поверхностным пластическим деформированием, что обеспечивает формирование микроструктуры, представляющей собой твердый раствор хрома и углерода в Fe<sub>α</sub> с мелкодисперсными включениями карбида хрома и содержанием углерода ≤ 0,08 % и преимущественной ориентацией структурных составляющих в радиальном направлении. Поверхностное пластическое деформирование, вызывающее изменение ориентации структурных составляющих вдоль обрабатываемой поверхности и увеличение плотности дислокаций с  $0,566 \cdot 10^7$  до  $0,712 \cdot 10^9$  см<sup>-2</sup>, препятствует росту радиально ориентированных трещин и увеличивает твердость материала в 1,3-1,4 раза [1, 5, 8, 9, 16, 19, 26, 28].

4. В результате исследований, оптимизирующих режимы процесса наплавки при восстановлении коленчатых валов низкоуглеродистой легированной проволокой Св-08Х13, определены оптимальные режимы наплавки и последующей обработки поверхностным пластическим деформированием (сила тока 200-210 А, скорость подачи наплавляемой проволоки 192-196 м/ч и сила прижатия ролика 2,85-2,95 кН при обкатывании наплавленного покрытия после его обработки резанием), которые обеспечили повышение износостойкости покрытий на 6-8 % по сравнению с новыми валами и предел выносливости валов на уровне предела выносливости новых деталей с коэф-

фициентом корреляции этих свойств, равным (-0,798) [3, 5, 9, 11–13, 17, 20–25, 27, 29–31].

5. По результатам металлографических и фрактографических исследований установлен механизм образования усталостных трещин на восстановленных методом наплавки стальных коленчатых валах, согласно которому очаговая усталостная трещина возникает в переходной зоне между покрытием и деталью, ее края имеют участки с усталостными бороздками и фасетками межзеренного разрушения, а предел выносливости восстановленных валов определяется размерами этой зоны и структурой материала. При уменьшении переходной зоны от 65–70 до 10–15 мкм и при отношении микротвердости материала покрытия и детали более 1,6 раза предел выносливости повышается в 1,4–1,5 раза [4, 6, 10, 11, 18].

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

Использование в производственных условиях процесса восстановления коленчатых валов с применением предложенного исходного материала покрытий, оптимальных режимов его нанесения и обработки, оснастки для поверхностного пластического деформирования материала покрытий обеспечивает экономически эффективное достижение нормативного послеремонтного ресурса. Ожидаемый экономический эффект от внедрения технологических процессов составил при восстановлении чугунного коленчатого вала напылением – 33600 руб., стального коленчатого вала наплавкой – 101300 руб.

Технологические процессы восстановления коленчатых валов из высокопрочного чугуна ВЧ50 ТП № 0915516.01102.00206-5 и конструкционной стали 45 ТП № 0915516.01102.00108-5, а также оснастка для поверхностного пластического деформирования материала покрытий внедрены на ОАО Полоцкий завод «Проммашремонт». Проведена оценка возможности использования результатов диссертационных исследований для восстановления коленчатых валов дизельных двигателей Д-240 и Д-245 на ОАО «Верхнедвинский райагросервис». Результаты исследований могут быть использованы для восстановления коленчатых валов автомобильных и тракторных двигателей ММЗ, УМЗ, ЗМЗ на других ремонтных предприятиях Республики Беларусь. Результаты диссертационной работы использованы в лекционных материалах и лабораторных практикумах по дисциплинам «Технологии и оборудование восстановления и упрочнения деталей машин и приборов», «Основы повышения эксплуатационной стойкости поверхностей» и «Технология производства и ремонта автомобилей» при подготовке студентов по специальностям 1-36 01 04 и 1-37 01 06. Работа применима и к восстановлению коленчатых валов двигателей, выпуск которых прекращен.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

### *Научная монография*

1. Кастрюк, А.П. Ресурсосбережение и качество ремонта агрегатов машин с восстановлением их деталей: научное издание. / А.П. Кастрюк, Т.В. Вигерина. – Новополоцк: ПГУ, 2012. – 199 с. (С. 4–122).

### *Статьи в рецензируемых журналах и сборниках*

2. Константинов, В.М. Структура и свойства слоя, полученного плазменным оплавлением обмазки на поверхности чугуновой 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.
3. 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.
4. Иванов, В.П. Повышение усталостной прочности валов, восстанавливаемых 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.
5. 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.
6. 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.
7. Иванов, В.П. Повышение качества восстановления деталей с нанесением покрытий / В.П. Иванов, Т.В. Вигерина // Горная механика. – 2009. – № 4. – С. 80–87.
8. Штемпель, О.П. Особенности строения наплавленных покрытий и их влияние на эксплуатационную надежность восстановленных деталей / О.П. Штемпель, Т.В. Вигерина // Техника в сельском хозяйстве. – 2010. – № 6. – С. 15–17.

9. Вигерина, Т.В. Обеспечение износостойкости и усталостной прочности восстанавливаемых коленчатых валов двигателей / Т.В. Вигерина // Агропанорама. – 2011. – № 2. – С. 44–48.

10. Вигерина, Т.В. Повышение износоусталостных характеристик валов, восстановленных наплавкой материала / Т.В. Вигерина // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки. – 2011. – № 11. – С. 85–88.

11. Кастрюк, А.П. Ресурсосберегающие процессы восстановления валов / А.П. Кастрюк, Т.В. Вигерина // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2011. – № 2. – С. 118–122.

12. Вигерина, Т.В. Влияние поверхностного пластического деформирования материала покрытий на эксплуатационные свойства коленчатых валов / Т.В. Вигерина // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. Машиностроение. – 2011. – № 3. – С. 34–39.

13. Вигерина, Т.В. Влияние наплавки на длину коленчатого вала при восстановлении / Т.В. Вигерина // Вестник БНТУ. – 2011. № 6. – С. 14–18.

14. Кастрюк, А.П. Композиционный порошковый материал для восстановления или упрочнения деталей двигателей внутреннего сгорания / А.П. Кастрюк, Т.В. Вигерина, О.П. Штемпель, В.А. Фруцкий // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки. – 2012. № 11. – С. 79–84.

15. Вигерина, Т.В. Техническое состояние коленчатых валов из высокопрочного чугуна и выбор материала для их восстановления / Т.В. Вигерина // Наука и техника. – 2013. – № 2. – С. 18–22.

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

16. Вигерина, Т.В. Изучение особенностей обезуглероживания чугуновой 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.

17. 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 апр. 2007 г.: в 3-х т.; ПГУ. – Новополоцк, 2007. – Т. III. – С. 10–12.

18. 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.

19. Вигерина, Т.В. Восстановление валов двигателей внутреннего сгорания / Т.В. Вигерина // Наука и инновации. Технологии: материалы III междунар. науч.-практ. конф., София, 16 – 31 окт. 2007 г. – София: «Бял ГРАД-БГ» ООД, 2007. – Т. 10: Технологии. – С. 38–40.

20. 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.

21. 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 февр. 2009 г.; АТМУ. – Киев, 2009. – С. 99–102.

22. 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 апр. 2009 г.: в 2 ч.; БГАТУ. – Минск, 2009. – Ч. 1. – С. 162–168.

23. Вигерина, Т.В. Усталостная прочность и износостойкость 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 апр. 2009 г.: в 3-х т.; ПГУ. – Новополоцк, 2009. – Т. III. – С. 223–226.

24. 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 сент. 2009 г.; БСХА. – Горки, 2009. – С. 116–122.

25. Вигерина, Т.В. Восстановление валов сельскохозяйственных машин / Т.В. Вигерина // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве: материалы междунар. науч.-практ. конф., Минск, 21 – 22 окт. 2009 г.: в 3 т.; РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Минск, 2009. – Т. 1. – С. 192–195.

26. 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 апр.

2010 г.: в 3 ч.; ГУ ВПО «Белорус.-Рос. ун-т». – Могилев, 2010. – Ч. 1. – С. 179–180.

27. 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.

28. Вигерина, Т.В. Упрочнение шеек коленчатых валов поверхностным пластическим деформированием / Т.В. Вигерина // Инновационные технологии в машиностроении: сб. материалов междунар. науч.-техн. конф., 19 – 20 окт. 2011 г.; ПГУ. – Новополоцк, 2011. – С. 218–220.

29. Иванов, В.П. Выбор технологических баз при обработке резанием восстанавливаемых коленчатых валов / В.П. Иванов, Т.В. Вигерина // Композиционные материалы и защитные покрытия: сб. материалов научно-техн. семинара, 27–28 ноября. 2012 г; Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси. – Минск, 2012. – С. 38–42.

### ***Изобретения, патенты, заявки***

30. 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.

31. Устройство для поверхностного пластического деформирования цилиндрических поверхностей: пат. 7958 16.10.2011 Респ. Беларусь МПК (2006) В 24В 39/00 / В.П. Иванов, Т.В. Вигерина, Н.Л. Кравченко; заявитель Полоцк. гос. ун-т. – и 20110516; заявл. 11.06.27; опубл. 11.11.15 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. – № 1. – С. 223.

32. Порошковый материал для напыления износостойких покрытий: решение о выдаче пат. № 16657 Респ. Беларусь, МПК 23 С 4/04 / В.П. Иванов, Т.В. Вигерина, А.П. Кастрюк, О.П. Штемпель, В.А.Фруцкий; заявитель Полоц. гос. ун-т; заявка № а 20110604; приоритет 10.05.2011.

## РЭЗІЮМЭ

**ВІГЕРЫНА Таццяна Уладзіміраўна**

### **ТЭХНАЛОГІІ АДНАЎЛЕННЯ КАЛЕНЧАТЫХ ВАЛАЎ РУХАВІКОЎ З ВЫСОКАТРЫВАЛАГА ЧЫГУНУ І КАНСТРУКЦЫЙНАЙ СТАЛІ НАПЫЛЕНЕМ, НАПЛАЎКАЙ І ПАВЯРХОЎНЫМ ПЛАСТЫЧНЫМ ДЭФАРМАВАННЕМ**

**Ключавыя словы:** каленчаты вал, аднаўленне, зносастойкасць, стомленасная трываласць, пакрыццё, дэфармаванне, састаў, структура.

**Мэта працы** – распрацоўка тэхналагічных працэсаў аднаўлення каленчатых валаў з высокатрывалага чыгуну і канструкцыйнай сталі напыленнем і наплаўкай з наступным павярхоўным пластычным дэфармаваннем, якія забяспечваюць іх нарматыўны посярамонтным рэсурсам.

**Метады даследавання і апаратура.** Мікрацвёрдасць вымяралася на мікрацвердамерах ПМТ-3 і ВUЕНLER Model No 1105D; цвёрдасць пакрыццяў метадам Раквелла на прыборы ТК і метадам Вікерса на прыборы IT2010-10; мікраструктура наплаўленага слоя вывучалася пры дапамозе мікраскопа Nicon Model і растравага электроннага мікраскопа LEO 1420. Тэмпературны каэфі-цыент лінейнага расшырэння матэрыялу пакрыцця вызначаўся тэнзамерным метадам. Скажэнні крышталічнай рашоткі вызначаліся на дыфрактометры ДРОН-3. Інтэнсіўнасць зношвання адноўленых узораў 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. 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 граніцу вынослівасці. Атрымана матэматычная залежнасць напружана-дэфармацыйнага стану наплаўленага элемента дэталі. Аптымізаваны працэс наплаўкі і наступнай механічнай апрацоўкі загатоўкі згодна з крытэрыямі зносастойкасці і стомленаснай трываласці. Сканструявана і выраблена прыстасаванне для абкатвання галтэлей і цыліндрычных паверхняў наплаўленых шыек каленчатых валаў.

**Вынікі даследавання** ўкаранёны на ААТ Полацкі завод «Прамашрамонт» і ў навучальны працэс Полацкага дзяржаўнага ўніверсітэта.

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

## РЕЗЮМЕ

**ВИГЕРИНА Татьяна Владимировна**

### **ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ КОЛЕНЧАТЫХ ВАЛОВ ДВИГАТЕЛЕЙ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА И КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ НАПЫЛЕНИЕМ, НАПЛАВКОЙ И ПОВЕРХНОСТНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ**

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

**Цель работы** – разработка технологических процессов восстановления коленчатых валов из высокопрочного чугуна и конструкционной стали напылением и наплавкой с последующим поверхностным пластическим деформированием, обеспечивающих их нормативный послеремонтный ресурс.

**Методы исследования и аппаратура.** Микротвердость измерялась на микротвердомерах ПМТ-3 и BUEHLER Model No 1105D; твердость покрытий – методом Роквелла на приборе ТК и методом Виккерса на приборе ИТ2010-10; микроструктура наплавленного слоя изучалась при помощи микроскопа Nikon Model и растрового электронного микроскопа LEO 1420. Температурный коэффициент линейного расширения материала покрытия определялся тензометрическим методом. Искажения кристаллической решетки определялись на дифрактометре ДРОН-3. 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.

## SUMMARY

VIGERINA Tatyana Vladimirovna

### RECOVERY TECHNOLOGIES OF CRANKSHAFTS ENGINES FROM HIGH-STRENGTH CAST IRON AND CONSTRUCTIONAL STEEL BY THE COATING, WELDING AND SURFACE PLASTIC DEFORMATION

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

**The work purpose** – development of technological processes of recovery crankshafts from high-strength cast iron and constructional steel by coating and welding methods followed by surface plastic deformation, providing their standard post-repair resource.

**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 Nikon 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.

Научное издание

**ВИГЕРИНА** Татьяна Владимировна

**ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ КОЛЕНЧАТЫХ ВАЛОВ  
ДВИГАТЕЛЕЙ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА  
И КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ НАПЫЛЕНИЕМ, НАПЛАВКОЙ  
И ПОВЕРХНОСТНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ**

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальности  
05.02.08 – Технология машиностроения

Подписано в печать 12.09.2013. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 1,39. Уч.-изд. л. 1,09. Тираж 60. Заказ 925.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет. ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.