

На правах рукописи

Ник

НИКОНОВ Вадим Олегович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ
ШЕЕК КОЛЕНЧАТЫХ ВАЛОВ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ
ПЛАЗМЕННЫМ НАПЫЛЕНИЕМ С ОДНОВРЕМЕННОЙ
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ**

05.22.10 – Эксплуатация автомобильного транспорта

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Владимир 2013

Работа выполнена на кафедре «Производство, ремонт и эксплуатация машин» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Воронежская государственная лесотехническая академия» (ВГЛТА).

Научный руководитель **Посметьев Валерий Иванович,**
доктор технических наук, профессор кафедры «Производство,
ремонт и эксплуатация машин» ФГБОУ ВПО «Воронежская
государственная лесотехническая академия» (ВГЛТА)

Официальные оппоненты: **Карагодин Виктор Иванович,**
доктор технических наук, профессор кафедры «Производство
и ремонт автомобилей и дорожных машин» ФГБОУ ВПО
«Московский автомобильно-дорожный государственный
технический университет» (МАДИ)

Ратников Александр Станиславович,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобиль-
ный транспорт» ФГБОУ ВПО «Владимирский государствен-
ный университет имени Александра Григорьевича и Николая
Григорьевича Столетовых» (ВлГУ)

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Тульский государственный университет» (ТулГУ)

Защита диссертации состоится 10 декабря 2013 г. в 14.00 ч. на заседании диссертационного совета Д 212.025.02 при ВлГУ по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, 87, корп. 1, ауд. № 335.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ВлГУ по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, 87, корп. 1. Автореферат размещён на сайтах ВАК РФ (<http://vak.ed.gov.ru>) и ВлГУ (www.vlsu.ru).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенные печатью организации, просим направлять ученому секретарю диссертационного совета, тел. 8 (4922) 53-34-97; факс 8 (4922) 36-19-81;
Email: bagenovyv@mail.ru.

Автореферат разослан « ___ » _____ 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат технических наук, профессор



Ю. В. Баженов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Наиболее характерными дефектами коленчатых валов автомобильных двигателей при ремонте являются износ коренных и шатунных шеек, обусловленный высокими удельными поверхностными нагрузками, а также трещины усталостного характера вследствие знакопеременных и циклических нагрузок, воздействующих на шейки. Восстановление коленчатого вала является сложной проблемой, поскольку к качеству и геометрическим параметрам его рабочих поверхностей предъявляются высокие требования. Наиболее перспективным направлением восстановления коленчатых валов автомобильных двигателей, является нанесение на изношенные поверхности упрочняющих покрытий.

Среди известных способов нанесения покрытий при восстановлении шеек коленчатых валов к прогрессивным относят плазменное напыление, так как оно отличается: возможностью напыления наиболее широкой номенклатуры материалов покрытий на различные материалы, высокой производительностью процесса, относительной простотой технологии, незначительным термическим влиянием на подложку, возможностью полной автоматизации процесса. Тем не менее, покрытия, полученные данным способом, имеют недостаточную прочность сцепления с основой при значительных знакопеременных нагрузках, структурную неоднородность, высокие остаточные растягивающие напряжения, приводящие к растрескиванию покрытия, наносимого на шейки коленчатых валов. Для устранения этих недостатков применяют упрочнение покрытий, как в процессе напыления, так и после него, с помощью различных видов энергетических воздействий. Одним из таких способов является последующая электромеханическая обработка напыленных покрытий, позволяющая повысить адгезионную и когезионную прочность, микротвердость, создать сжимающие остаточные напряжения для повышения сопротивления усталости и получить более однородное покрытие. Однако последующая после напыления электромеханическая обработка имеет ограничения по максимальной толщине покрытий, при которых они не разрушаются. Это обстоятельство приводит к повышению трудоемкости нанесения и упрочнения покрытий толщиной, сопоставимой с разницей между диаметром шеек нового коленчатого вала и их последним ремонтным размером. В этой связи исследование, направленное на совершенствование технологического процесса восстановления шеек коленчатых валов автомобильных двигателей способом плазменного напыления с одновременной электромеханической обработкой, является актуальным.

Работа является частью комплексных исследований: по госбюджетной теме Воронежской государственной лесотехнической академии «Динамизация процессов плазменного нанесения и упрочнения покрытий путем модуляции параметров», номер госрегистрации 7.4045.2011; по краткосрочной научно-исследовательской работе «Комбинированный метод плазменного напыления с одновременной электромеханической обработкой покрытий в режиме модуляции параметров» на базе научно образовательного центра «Нанотехнологии для нефтяной и газовой промышленности» РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина в рамках выполнения гранта на поддержку научных исследований.

Степень разработанности темы исследования. Изучению вопросов, связанных с повышением качества восстановления коленчатых валов двигателей автомобилей, посвящены работы ученых: Е. В. Агеева, Е. Л. Воловика, В. А. Деева, Л. В. Дехтеринского, А. А. Зуева, В. А. Какуевичко, В. И. Карагодина, В. П. Лялякина, М. А. Масино, А. Н. Новикова, В. К. Петрякова, В. В. Сергеева, Д. И. Станчева, Г. Е. Филатова, А. И. Фомина, В. И. Черноиванова, В. К. Ярошевича и др. Исследованию плазменного напыления покрытий посвящены работы ученых: Ю. С. Борисова, В. М. Кудинова, А. Ф. Пузрякова, А. И. Сидорова, Н. А. Соснина, Л. И. Тушинского, А. Хасуи и др. Применительно к коленчатым валам двигателей внутреннего сгорания плазменным напылением занимались ученые: М. М. Баранкевич, А. Н. Гоц, Н. Г. Гришин, А. М. Кадырметов, В. Б. Ку-

рушин, Р. А. Лиджи-Горяев, Т. Н. Миллер, В. П. Лялякин, С. В. Петров, В. И. Посметьев, Б. М. Соловьев, А. И. Сидоров, П. А. Тополянский, В. И. Черноиванов и др. Решением проблемы упрочнения плазменных покрытий способом воздействия на напыленную поверхность детали электромеханической обработкой посвящены работы ученых: Б. М. Аскинази, В. М. Багмутова, И. Н. Захарова, А. Ю. Иванникова, В. И. Калиты, Д. И. Комлева и др. Однако в трудах этих ученых не рассматриваются вопросы исследования и оценки влияния режимов и параметров процесса на эффективность и качество восстановления покрытий шеек коленчатых валов новым методом плазменного напыления с одновременной электромеханической обработкой.

Цель и задачи исследования. Целью исследования является совершенствование технологии восстановления шеек коленчатых валов автомобильных двигателей плазменным напылением с одновременной электромеханической обработкой.

Задачи исследования:

– обосновать целесообразность и определить направление исследования по совершенствованию технологии восстановления и упрочнения шеек коленчатых валов автомобильных двигателей новым комбинированным способом плазменного напыления с одновременной электромеханической обработкой;

– разработать математическую модель, алгоритмы и программы для ЭВМ и на их основе выполнить имитационное моделирование и исследование процесса плазменного напыления с одновременной электромеханической обработкой шеек коленчатого вала;

– разработать математическую модель, алгоритмы и программы для ЭВМ и на их основе выполнить имитационное моделирование и исследование процесса распространения тепла в коленчатом вале при восстановлении его шеек новым комбинированным способом с использованием различных вариантов и параметров охлаждения;

– определить зависимости критериев процесса плазменного напыления с одновременной электромеханической обработкой от его параметров и найти их оптимальные значения;

– обосновать технологические режимы восстановления шеек коленчатых валов новым способом, обеспечивающие повышение эффективности их восстановления и эксплуатационных свойств покрытия.

Научная новизна результатов работы:

– разработаны математическая модель плазменного напыления с одновременной электромеханической обработкой покрытия и имитационная модель на её основе, реализованная в новой программе для ЭВМ, позволившая обосновать технологические операции нового комбинированного способа плазменного напыления с одновременной электромеханической обработкой для восстановления шеек коленчатых валов автомобильных двигателей, отличающаяся комплексным подходом, учетом основных внутренних и внешних факторов, и особенностями выполняемых операций;

– разработаны математическая модель тепловых процессов в плазменном напылении с одновременной электромеханической обработкой покрытия и имитационная модель на её основе, реализованная в новой программе для ЭВМ, описывающая распространения тепла в коленчатом вале автомобильного двигателя при восстановлении его шеек новым комбинированным способом, отличающиеся возможностью оценки эффективности процесса и качественных показателей покрытия при использовании различных вариантов и параметров охлаждения;

– получены новые зависимости критериев от факторов процесса плазменного напыления с одновременной электромеханической обработкой, отличающиеся возможностью определения оптимальных параметров и режимов процесса, с целью создания более прочного покрытия и уменьшения внутренних напряжений в нем;

– обоснованы режимы и параметры нового комбинированного способа восстановления шеек коленчатых валов, отличающиеся оптимальными значениями и обеспечивающие совершенствование технологического процесса в направлении повышения износостойкости и долговечности покрытия.

Теоретическая значимость заключается в разработке математических моделей и на их основе имитационных моделей, алгоритмов и новых программ для ЭВМ, позволяющих комплексно исследовать влияние факторов на критерии процесса плазменного напыления с одновременной электромеханической обработкой при восстановлении шеек коленчатого вала автомобильного двигателя, а также находить оптимальные режимы и рабочие параметры при совершенствовании технологического процесса получения долговечных износостойких покрытий.

Практическая значимость заключается в совершенствовании технологического процесса по восстановлению и упрочнению шеек коленчатых валов автомобильных двигателей на основе нового способа плазменного напыления с одновременной электромеханической обработкой, а также в апробации и внедрении разработанных оборудования и рекомендаций на предприятиях по ремонту двигателей и автомобилей.

Методология и методы исследования. Диссертационное исследование выполнено на основе изучения научных трудов отечественных и зарубежных ученых и специалистов в области эксплуатации и ремонта автомобилей, занимающихся решением проблем восстановления и упрочнения изношенных рабочих поверхностей пар трения. Теоретическое исследование базировалось на классической физике, механике, математическом и имитационном моделировании, численных методах, а также современных методах получения и обработки информации при компьютерной поддержке. Математическое моделирование реализовано с помощью разновидности SPH-метода, использующего разбиение исследуемого объекта на дискретные элементы и применения для них классических законов физики. При проведении натурных наблюдений и экспериментов использовались методы определения физико-механических, триботехнических свойств покрытий, металлографический и рентгеноструктурный анализ, аппарат математической статистики и теории вероятностей, методы планирования эксперимента, регрессионный анализ.

Научные положения, выносимые на защиту:

– математическая модель и результаты имитационного моделирования на ЭВМ технологических операций комбинированного способа восстановления шеек коленчатых валов автомобильных двигателей, позволяющие установить закономерности и исследовать влияние основных факторов на процессы плазменного напыления с одновременной электромеханической обработкой;

– математическая модель и результаты имитационного моделирования на ЭВМ процесса распространения тепла в коленчатом вале при восстановлении его шеек новым комбинированным способом, позволяющие исследовать закономерности распространения температуры и обосновать выбор схемы и оптимальные параметры системы охлаждения;

– зависимости критериев от факторов процесса плазменного напыления с одновременной электромеханической обработкой, позволяющие исследовать и оценить эффективность их влияния на физико-механические свойства покрытия шеек коленчатых валов;

– обоснованные, оптимизированные режимы и параметры совмещенных операций плазменного напыления с одновременной электромеханической обработкой, позволившие реализовать результаты исследования в направлении совершенствования технологического процесса восстановления шеек коленчатых валов автомобильных двигателей покрытиями с повышенными эксплуатационными свойствами.

Достоверность научных положений обеспечена применением современных методов теории, эксперимента и оборудования, обоснованным объемом экспериментального материала,

хорошей сходимостью экспериментальных и теоретических данных, положительными результатами лабораторных, стендовых и эксплуатационных испытаний.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на научных конференциях профессорско-преподавательского состава Воронежской государственной лесотехнической академии (2011-2013 гг.), международных и всероссийских межвузовских научно-практических конференциях (Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых в Воронеже, 2011 г.; Региональная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых в Воронеже, 2012 г.; 14-ая и 15-ая международные научно-практические конференции в Санкт-Петербурге, 2012 и 2013 гг.; Международная заочная научно-практическая конференция в Липецке, 2012 г.; XVII-я международная научно-техническая интернет-конференция в Брянске, 2013 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 21 печатная работы, включая патенты на изобретение РФ № 2480533 и полезную модель РФ № 129021, 4 свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ, а также 7 статей в периодических научных изданиях, рекомендованных ВАК. Единолично опубликовано 3 статьи.

Реализация работы. Разработанная конструкция устройства для восстановления коренных и шатунных шеек коленчатого вала способом плазменного напыления с одновременной электромеханической обработкой, усовершенствованный технологический процесс и рекомендации по нему внедрены на авторемонтном предприятии ОАО 172 ЦАРЗ, г. Воронеж, автотранспортном предприятии НСК «Плюс», авторемонтном заводе ЗАО Ремдизель, г. Набережные Челны. Кроме этого результаты исследования внедрены в учебный процесс ВГЛТА, а также могут быть рекомендованы научным работникам, аспирантам, занимающимся разработкой способов и технологий повышения качества плазменных покрытий при восстановлении коленчатых валов двигателей автомобилей и других деталей машин типа "вал", работающих в аналогичных условиях.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка использованных источников и приложений. Общий объем работы составляет 187 страниц, из них 154 страницы основного текста и 33 страниц приложений. Работа включает 59 иллюстраций, 30 таблиц и 165 наименований использованных источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность темы, цель и задачи исследования, а также представлены другие структурные элементы общей характеристики выполненной работы.

В первом разделе на основании проведенного информационно-аналитического исследования: рассмотрены условия и особенности работы коленчатых валов двигателей автомобилей; определены традиционные и перспективные способы восстановления шеек коленчатых валов; обоснована целесообразность использования прогрессивного процесса плазменного напыления покрытий; рассмотрены основные недостатки покрытий полученных плазменным напылением и способы повышения их качества; предложен эффективный способ упрочнения плазменного покрытия последующей электромеханической обработкой; выявлены недостатки данного способа; установлено, что устранение этих недостатков возможно за счет объединения в одном технологическом процессе операций плазменного напыления и электромеханической обработки; поставлена цель и задачи исследования.

Во втором разделе приведено обоснование комбинированного способа упрочнения поверхностей деталей (патент РФ на изобретение № 2480533), схема которого представлена на рисунке 1. Способ реализуется плазменным напылением покрытия 1 на шейку коленчатого вала 2 с помощью плазменной струи 3 плазматрона 4 с одновременной электромеханической обработ-

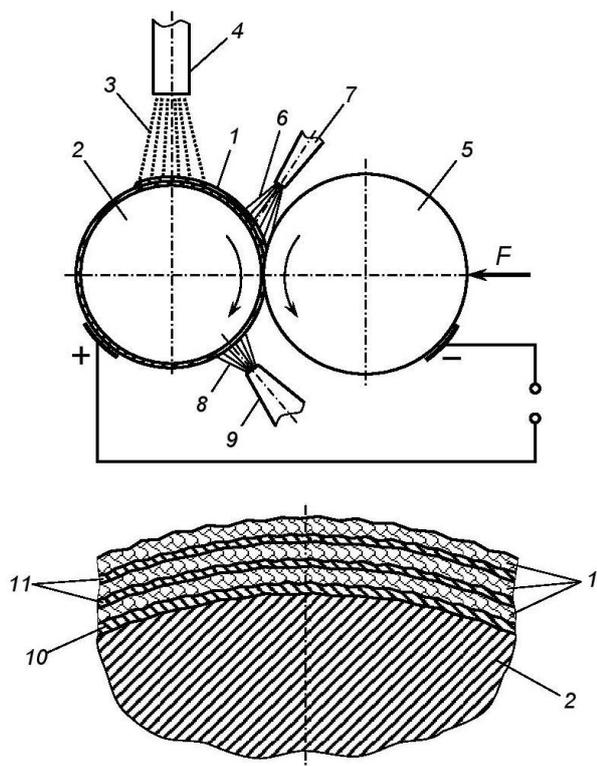


Рисунок 1 – Схема процесса плазменного напыления покрытия с его одновременной электромеханической обработкой

их пластические свойства, обеспечивает пластическую деформацию до состояния заполнения пор в покрытии, и тем самым ведет к увеличению плотности и когезионной прочности покрытия. Второй тепловой источник образуется на границе 10 покрытия 1 и шейки коленчатого вала 2 вследствие высокого электрического сопротивления в данной зоне и обеспечивает необходимые условия высокой адгезионной прочности покрытия. При нанесении второго и последующих слоев добавляются границы между слоями 11, представляющие собой дополнительные электрические сопротивления и, соответственно, источники тепла, обеспечивающие более благоприятные условия разрушения окислов в границах 11 и высокой прочности соединения слоев между собой.

Для описания формирования плазменного покрытия, электрических и тепловых процессов при плазменном напылении с одновременной электромеханической обработкой использовалась одна из разновидностей SPH-метода, в соответствии с которой покрытие рассматривается как совокупность большого количества элементов шарообразной формы диаметром 10 мкм. Моделирование производится в двухмерном пространстве XOY . Элементы моделируемой среды взаимодействуют между собой и движутся по законам классической механики. Состояние каждого элемента i в модели определяется четырьмя переменными: декартовыми координатами его центра (x_i , y_i) и двумя составляющими скорости (v_{xi} , v_{yi}). Каждый элемент i испытывает силовое воздействие со стороны каждого из окружающих его элементов j . В выражение для силы взаимодействия (рис. 2) между двумя элементами закладываются упругие свойства материала покрытия

$$F_{xij}^y = \begin{cases} c_{ij}(d_{\ominus} - r_{ij})(x_i - x_j) / r_{ij}, & \text{если } r_{ij} < d_{\ominus}; \\ 0, & \text{если } r_{ij} \geq d_{\ominus}; \end{cases} \quad (1)$$

$$F_{yij}^y = \begin{cases} c_{ij}(d_{\ominus} - r_{ij})(y_i - y_j) / r_{ij}, & \text{если } r_{ij} < d_{\ominus}; \\ 0, & \text{если } r_{ij} \geq d_{\ominus}; \end{cases} \quad (2)$$

кой напыляемого покрытия 1 с помощью ролика 5, обкатывающего покрытие с прижимным усилием F . За счет действия деформирующей силы происходит высокотемпературная пластическая деформация покрытия, в результате которой заполняются поры покрытия, увеличивается его плотность и прочность. Процесс осуществляется послойно с толщиной каждого слоя меньше критического значения, при котором остаточные напряжения приводят к растрескиванию и отслаиванию покрытия до нанесения необходимой суммарной толщины покрытия. Для смыва остатков моющего раствора от струи 6 охладителя 7 после зоны электромеханического воздействия на покрытие поверхность обрабатывается струей воды высокого давления 8 от форсунки 9. При прохождении электрического тока через первый слой покрытия образуются два источника тепла. Первый – в зоне контакта деформирующего инструмента 5 с покрытием 1, который нагревает компоненты покрытия и, вследствие этого, увеличивает

где F_{xij}^V и F_{yij}^V – декартовы составляющие силы F_{ij}^V ; c_{ij} – коэффициент жесткости упругого взаимодействия элементов; $d_{\text{э}}$ – диаметр элемента; $d_0 = k_{\text{оэп}} \cdot d_{\text{э}}$ – граничное расстояние притяжения.

Кроме того, учитываются составляющие силы, включающие диссипативные силы вязкого трения F_{xij}^B и F_{yij}^B , пропорциональные первой степени скорости относительного движения взаимодействующих элементов. Движение элемента описывается ньютоновскими уравнениями

$$m_{\text{э}} \frac{d^2 x_i}{dt^2} = \sum_{j=1}^{N_{\text{э}}} (F_{xij}^V + F_{xij}^B), \quad (3)$$

$$m_{\text{э}} \frac{d^2 y_i}{dt^2} = \sum_{j=1}^{N_{\text{э}}} (F_{yij}^V + F_{yij}^B) - m_{\text{э}} g, \quad (4)$$

где $m_{\text{э}}$ – масса элемента; t – время; $N_{\text{э}}$ – кол-во элементов покрытия; F_{ij}^V и F_{ij}^B – упругая и вязкая составляющие силы взаимодействия между элементами i и j ; g – ускорение свободного падения.

Тепловое состояние частиц моделируется общепринятым способом: путем задания связи их кинетической энергии хаотического движения с температурой. Кинетическая энергия элемента рассчитывалась по формуле

$$E_{Ki} = \frac{m_i v_{\text{юмн}}^2}{2} = \frac{m_i}{2} \left((v_{xi} - v_{\text{хср}(i)})^2 + (v_{yi} - v_{\text{хср}(i)})^2 \right), \quad (5)$$

где $v_{\text{юмн}}$ – модуль скорости движения i -го элемента относительно движущегося окружения; $v_{\text{хср}(i)}$ и $v_{\text{хср}(i)}$ – составляющие средней скорости движения среды в окрестности элемента i .

Было принято допущение, что кинетическая энергия элемента связана с его температурой следующим образом:

$$E_{Ki} = \frac{3}{2} k_B T_i, \quad (6)$$

где $3/2$ – коэффициент для сферически тел малого размера; k_B – постоянная Больцмана; T_i – температура i -го элемента.

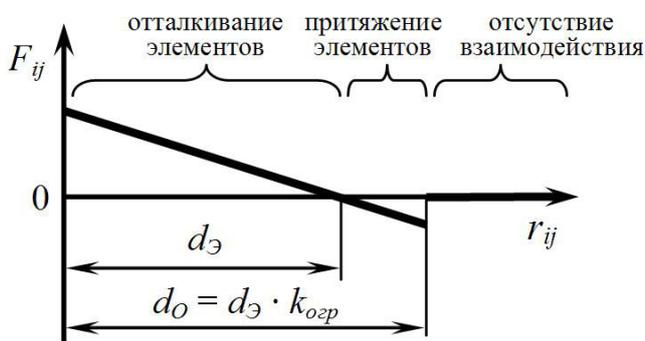


Рисунок 2 – Зависимость силы упругого взаимодействия элементов от расстояния между ними

Таким образом, для того, чтобы элемент имел необходимую температуру T_i необходимо, чтобы модуль его скорости относительно скорости среды был равен значению, определенному по выражению (7). Так как в результате механического взаимодействия элементов скорость их движения v_i может не соответствовать температуре T_i , на каждом шаге интегрирования, то проводится коррекция составляющих скорости v_x и v_y .

$$v_{\text{юмн}} = \sqrt{\frac{3k_B T_i}{m_i}}, \quad (7)$$

$$v_{xi} = v_{xicp(i)} + \sqrt{\frac{3k_B T_i}{m_i} \frac{v_{xi} - v_{xicp(i)}}{\sqrt{v_{xi}^2 + v_{yi}^2}}}, \quad (8)$$

$$v_{yi} = v_{yicp(i)} + \sqrt{\frac{3k_B T_i}{m_i} \frac{v_{yi} - v_{yicp(i)}}{\sqrt{v_{xi}^2 + v_{yi}^2}}}. \quad (9)$$

На каждом шаге интегрирования рассчитывается текущая температура, которая может меняться в результате теплообмена с окружающими элементами

$$T_i^{k+1} = T_i^k + \Delta t \cdot \sum_{j=1}^{N_C} \chi_{ij} \frac{T_j^k - T_i^k}{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}}, \quad (10)$$

где N_C – кол-во контактирующих элементов у i -го элемента; k и $k + 1$ – обозначения текущего и последующего шагов интегрирования; Δt – шаг интегрирования; χ_{ij} – локальная температуропроводность.

Восстанавливаемая поверхность в модели представлялась как ровная поверхность (в данном двумерном случае как прямая $y = 0$), ограничивающая движение поступающих элементов в направлении вниз, гасящая их скорость, отнимающая у них температуру и передающая им электрический потенциал. В случае контакта i -го элемента с поверхностью, что проверялось условием $y_i < d_i/2$, на него действовала дополнительная вязкоупругая сила $F_{xi\Pi}$, $F_{yi\Pi}$

$$F_{xi\Pi} = k_B v_{xi} (y_i - d_i / 2), \quad (11)$$

$$F_{yi\Pi} = c_{\Pi} (y_i - d_i / 2) + k_B v_{yi} (y_i - d_i / 2). \quad (12)$$

где c_{Π} – коэффициент жесткости между i -м элементом с поверхностью.

Теплопередача между i -м элементом и поверхностью рассчитывалась по формуле

$$T_i^{k+1} = T_i^k + \Delta t \cdot \chi_{i\Pi} \frac{T_{\Pi}^k - T_i^k}{d_i / 2 - y_i}, \quad (13)$$

где $\chi_{i\Pi}$ – коэффициент температуропроводности между элементом и поверхностью; T_{Π}^k – температура поверхности на k -м шаге интегрирования.

Прокатывающий ролик в модели представлен совокупностью множества элементов, расположенных по окружности. На каждом шаге интегрирования элементы ролика размещаются в пространстве с помощью следующих выражений:

$$x_i = x_{цр} + R_p \cdot \cos\left(\omega_p t + \frac{2\pi i}{N_{эп}}\right), \quad i = 1 \dots N_{эп}; \quad (14)$$

$$y_i = y_{цр} + R_p \cdot \sin\left(\omega_p t + \frac{2\pi i}{N_{эп}}\right), \quad i = 1 \dots N_{эп}; \quad (15)$$

где $x_{цр}$ и $y_{цр}$ – координаты центра ролика; R_p – радиус ролика; ω_p – угловая скорость вращения ролика; $N_{эп}$ – количество элементов, представляющих поверхность ролика.

Задача электропроводности решается с помощью модельной сетки (случайной плотно-упакованной), которая образована из контактирующих элементов покрытия. Если два элемента касаются, то есть расстояние между ними менее $(d_i + d_j)/2$, то за определенный шаг интегрирования Δt между ними протекает электрический ток

$$\phi_i^{k+1} = \phi_i^k + \Delta t \cdot \sum_{j=1}^{N_c} \sigma_{ij} \frac{\phi_j^k - \phi_i^k}{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}}, \quad (16)$$

где ϕ_i – электрический потенциал элемента i ; σ_{ij} – локальная проводимость.

В целом, модель представляет собой систему дифференциальных и алгебраических уравнений и решается численно модифицированным методом Эйлера-Коши. Шаг интегрирования системы дифференциальных уравнений был принят равным $\Delta t = 2 \cdot 10^{-5}$ с. Предложенная методика моделирования комбинированного способа восстановления шеек коленчатого вала позво-

ляет исследовать влияние большого количества факторов на критерии процесса (рис. 3).

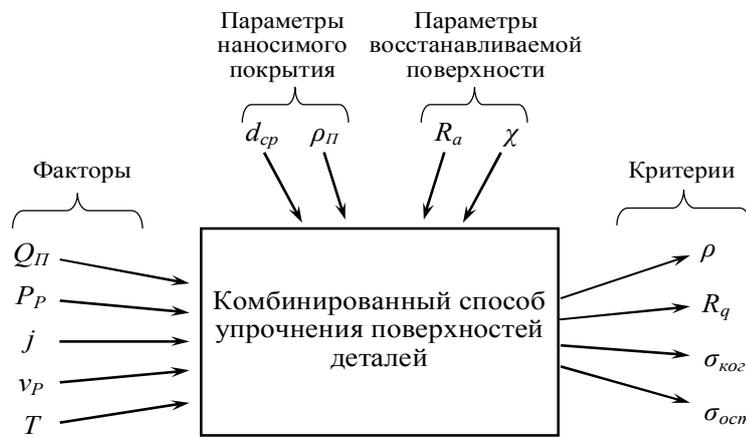


Рисунок 3 – Входные и выходные параметры математической модели

ляет исследовать влияние большого количества факторов на критерии процесса (рис. 3). Здесь $Q_{п}$ – расход порошка; P_p – давление, оказываемое на покрытие прикатывающим роликом; j – плотность тока, протекающего через покрытие при электрохимической обработке; v_p – скорость движения прикатывающего ролика по поверхности; T – температура частиц порошка перед касанием поверхности; d_{cp} – средний диаметр частиц порошка; $\rho_{п}$ – плотность материала порошка; R_a – шероховатость поверхности; χ – температуропроводность материала детали вблизи поверхности; ρ – плотность покрытия после прохода ролика; R_q – шероховатость покрытия; $\sigma_{коз}$ – когезионная прочность покрытия; $\sigma_{ост}$ – остаточные напряжения в покрытии.

При разработке математической модели распространения тепла в коленчатом вале автомобильного двигателя для комбинированного метода при охлаждении водяной струей, использовался сеточный конечно-разностный численный метод. Модель основана на базовых уравнениях классической термодинамики. В трехмерном случае распространение тепла описывается уравнением теплопроводности

$$\frac{\partial}{\partial t} T(\vec{r}, t) = (\nabla, \chi(\vec{r}, t) \nabla T(\vec{r}, t)) + Q(\vec{r}, t); \quad (17)$$

где $T(\vec{r}, t)$ – распределение температуры в пространстве и его изменение с течением времени; \vec{r} – радиус вектор исследуемой точки пространства; t – время; $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \vec{k}$ – дифференциальный оператор набла; x, y, z – декартовы координаты исследуемой точки пространства; $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – единичные векторы в декартовом пространстве; $\chi(\vec{r}, t)$ – коэффициент температуропроводности вещества (в общем случае зависит от положения в пространстве и времени); $Q(\vec{r}, t)$ – изменяю-

щееся с течением времени поле источников нагрева и охлаждения в данной схеме нанесения покрытия. Коэффициент температуропроводности может быть выражен через коэффициенты теплопроводности κ , теплоемкости c и плотность вещества ρ следующим образом: $\chi = \kappa / (c\rho)$.

Пространство, в котором производится моделирование, дискретизировано прямоугольной сеткой (рис. 4, а). Сетка для решения уравнения теплопроводности представлена узлами, причем, каждый узел сетки имеет шесть соседних узлов, от которых возможен прием и передача тепла (рис. 4, б). В конечно-разностной постановке задачи уравнение (17) преобразуется следующим образом. Для каждого узла (i, j, k) и на каждом шаге интегрирования температура $T_{i,j,k}$ зависит от температуры соседних узлов следующим образом:

$$\frac{\Delta T_{i,j,k}}{\Delta t} = \chi_{i,j,k} \left(\frac{(T_{i+1,j,k} - T_{i,j,k}) - (T_{i,j,k} - T_{i-1,j,k})}{(\Delta x)^2} + \frac{(T_{i,j+1,k} - T_{i,j,k}) - (T_{i,j,k} - T_{i,j-1,k})}{(\Delta y)^2} + \frac{(T_{i,j,k+1} - T_{i,j,k}) - (T_{i,j,k} - T_{i,j,k-1})}{(\Delta z)^2} \right) + Q_{i,j,k}, \quad (18)$$

где Δt – шаг дискретизации по времени; $\Delta x = \Delta y = \Delta z = h$ – шаг дискретизации пространства; χ – коэффициент температуропроводности; $Q_{i,j,k}$ – поступление тепла от внешней среды к данной ячейке.

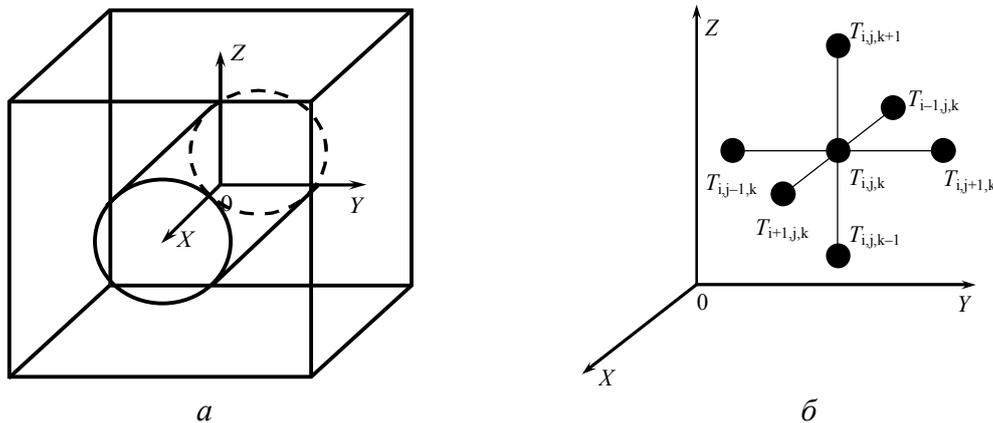


Рисунок 4 – Представление геометрической области вала в модели а и крестообразная схема учета соседних узлов при сеточном решении уравнения теплопроводности б

Компьютерные эксперименты выполнялись с помощью разработанных имитационных моделей, алгоритмов и программы для ЭВМ (свидетельства №№: 2013612101, 2013612100, 2013615055, 2013615740). На первом этапе теоретического исследования было изучено влияние отдельных факторов, для чего с помощью имитационного моделирования были проведены серии экспериментов влияния расхода порошка $Q_{п}$, давления обкатки P_p и плотности тока j на критерии процесса. На следующем этапе исследования были получены двухфакторные зависимости и выполнен их анализ. В качестве факторов выбран показатель процесса плазменного нанесения покрытия – расход порошка $Q_{п}$, а также наиболее важный показатель процесса электромеханической обработки – плотность тока j в месте контакта обкатывающего ролика и покрытия.

Аппроксимационные зависимости определялись в виде полиномов второго порядка. Для определения коэффициентов зависимостей $P(Q_{п}, j)$ использовали аппроксимацию методом наименьших квадратов. В результате аппроксимации были получены следующие формулы, позволяющие оперативно оценить результаты процесса нанесения покрытия при выборе параметров процесса:

$$\rho(Q_{II}, j) = -27 Q_{II}^2 + 3,45 \cdot 10^{-3} j^2 - 0,817 Q_{II} j + 355 Q_{II} + 3,22 j + 1,48 \cdot 10^3; \quad (19)$$

$$R_q(Q_{II}, j) = 0,016 Q_{II}^2 + 6,30 \cdot 10^{-6} j^2 + 5,60 \cdot 10^{-5} Q_{II} j + 0,040 Q_{II} - 1,69 \cdot 10^{-3} j + 0,198 \cdot 10^3; \quad (20)$$

$$\sigma_{коз}(Q_{II}, j) = 3,18 Q_{II}^2 - 2,07 \cdot 10^{-4} j^2 - 22,9 Q_{II} + 0,066 j + 41,4; \quad (21)$$

$$\sigma_{ост}(Q_{II}, j) = 7,0 \cdot 10^{-4} Q_{II}^2 + 2,51 \cdot 10^{-7} j^2 - 2,50 \cdot 10^{-5} Q_{II} j + 6,0 \cdot 10^{-4} Q_{II} - 1,13 \cdot 10^{-5} j - 2,43 \cdot 10^{-4}. \quad (22)$$

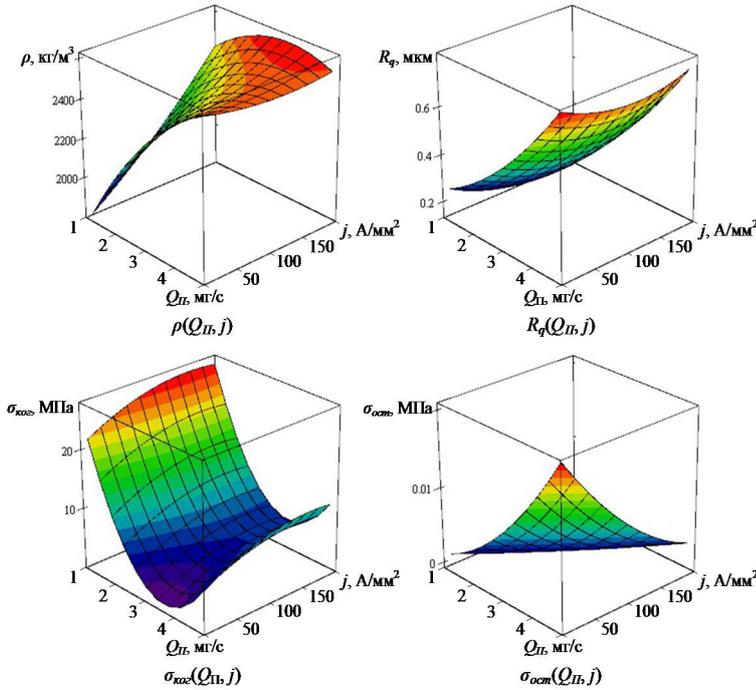


Рисунок 5 – Поверхности отклика к оптимизации параметров процесса нанесения покрытия

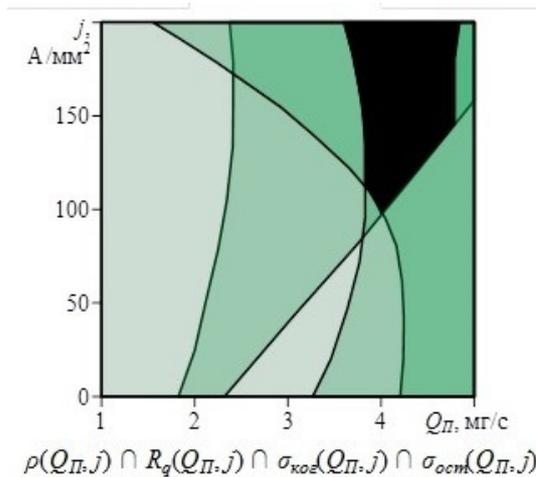
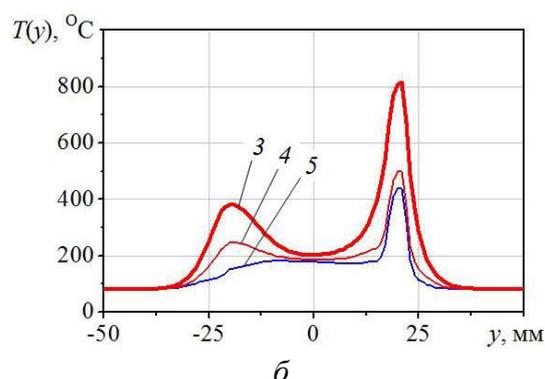
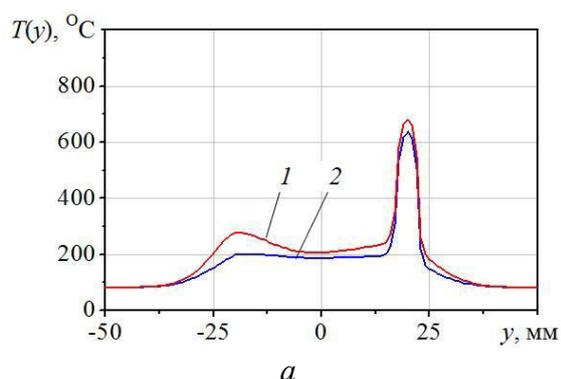


Рисунок 6 – Области оптимизации параметров процесса нанесения покрытия комбинированным способом

струй водяного охлаждения (после проходов плазмотрона и обкатывающего ролика), позволяет поддерживать среднюю температуру детали на уровне 150°C . Такая относительно низкая средняя температура существенно снижает вероятность образования внутренних напряжений в окончательно сформированном покрытии.

При двухфакторной оптимизации появляется возможность графически изобразить поверхности отклика и провести их визуальный анализ (рис. 5). Наложение благоприятных областей дает общую оптимальную область – зачерченная на рисунке 6. Оптимальной области соответствует диапазон расхода порошка $3,8-4,8$ мг/с и диапазон плотности тока $90-200$ А/мм². При этих параметрах процесса обеспечивается плотность, образующегося покрытия ρ – более 2500 кг/м³, шероховатость поверхности R_q – менее $0,5$ мкм, когезионная прочность покрытия $\sigma_{коз}$ – более 10 МПа, остаточные напряжения $\sigma_{ост}$ – менее $0,5$ МПа.

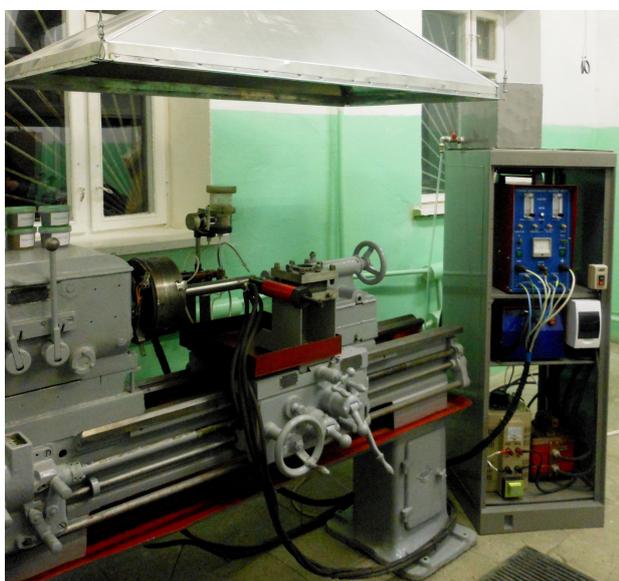
Для количественного анализа распределения температуры в поперечном сечении шейки колеччатого вала построена серия профилей температуры (рис. 7). В случае проведения дополнительной электрохимической обработки с пропусканием значительных токов, нагрев шейки существенно увеличивается. В случае отсутствия водяного охлаждения средняя температура поверхности шейки при электрохимической обработке приблизительно на 200°C выше, чем в случае отсутствия таковой. В то же время, использование двух



1-5 – номера компьютерного эксперимента: плазменное нанесение покрытия без электромеханической обработкой и без охлаждения – 1, с охлаждением струей воды – 2; плазменное нанесение покрытия с электромеханической обработкой и без охлаждения – 3, с охлаждением струей воды после прохода пятна плазматрона – 4, с охлаждением струей воды как после прохода пятна плазматрона, так и после прохода обкатывающего ролика – 5

Рисунок 7 – Распределение температуры в поперечном сечении шейки коленчатого вала (в области "пятна нагрева плазмой") при плазменном нанесении покрытия без *a* и с дополнительной электромеханической обработкой *б*

В третьем разделе приведены основные положения общей методики экспериментального исследования; разработаны средства технологического обеспечения процесса плазменного напыления с одновременной электромеханической обработкой (рис. 8), обоснован выбор рабочих материалов.



a – общий вид оборудования; *б* – процесс восстановления опытных образцов

Рисунок 8 – Установка для осуществления процесса плазменного напыления с одновременной электромеханической обработкой на опытных образцах

Процесс плазменного напыления с одновременной электромеханической обработкой осуществляется плазматроном с конструктивными параметрами: расстояние до выносного анода-шайбы 4 мм, угол заточки катода 65°, вынос катода 1 мм; кинематическими параметрами: скорость вращения образцов 10 об./мин, подача 1 мм/об.; химическим составом плазмообразующего и защитного газа (аргон), гранулометрическим составом и формой частиц порошка для

материалов подложки сталь 45 и покрытий ПГСР-4; одинаковой дистанцией напыления 40 мм, обеспечивающей необходимое проплавление покрытия без перегрева подложки; углом подачи порошка под срез плазматрона 25-35°. В процессе напыления покрытия его электромеханическая обработка производится роликом из твердого сплава ВК-8 с радиусами рабочего профиля $r = 36$ мм и $R = 4$ мм. Скорость обкатки и продольная подача обеспечиваются величинами, аналогичными для плазменного напыления. Охлаждение зоны обкатки осуществляется 10 % раствором эмульсола Экол-1 с расходом 0,5 л/мин, а смыв его остатков – струей воды высокого давления с параметрами: расход 4,5 л/мин, давление перед форсункой 9 МПа.

Результаты обработки оценивали путем металлографического и рентгеноструктурного анализа, измерением: прочности соединения покрытия с основой, пористости, микротвердости на поверхности и по толщине покрытия; испытанием на износ и определением предела выносливости покрытия.

В четвертом разделе представлено экспериментальное подтверждение математической модели, а также результаты исследований физико-механических и триботехнических свойств покрытий, полученных плазменным напылением с одновременной электромеханической обработкой. На основе методов планирования экспериментов получены уравнения регрессии, которые позволили определить оптимальные технологические режимы нанесения покрытия на образцы с помощью комбинированного процесса, обеспечивающие максимальную износостойкость для наносимого порошка.

Износостойкость покрытий, полученных по технологии плазменного напыления с одновременной электромеханической обработкой (ПНЭМО), во всем диапазоне исследованных нагрузок и скоростей оказалась выше, чем у покрытий, полученных отдельно по технологиям плазменного напыления (ПН) и плазменного напыления с последующей электромеханической обработкой (ПНЭМОП) (рис. 9).

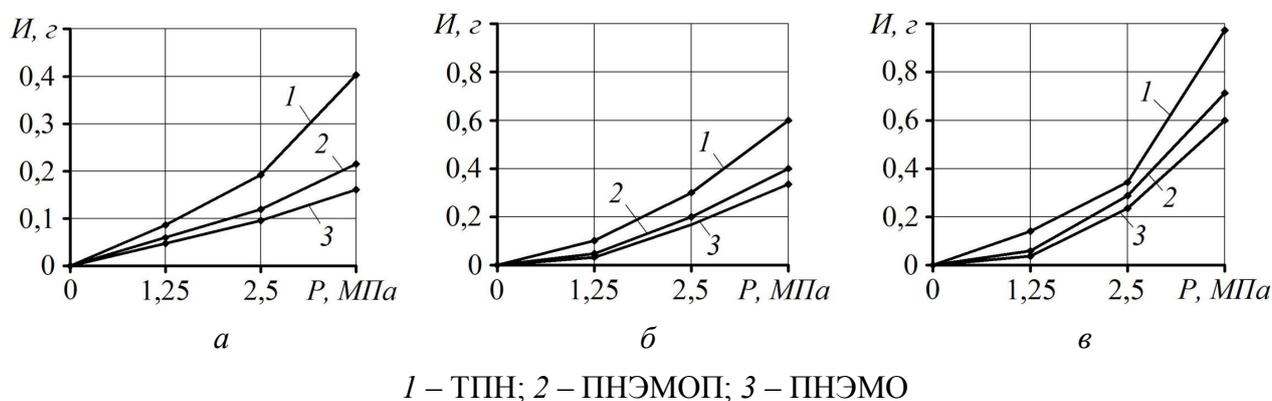


Рисунок 9 – Зависимости износа I покрытия ПГСР-4 от удельного давления P при различных скоростях скольжения: $a - V = 0,78$ м/с; $b - V = 1,3$ м/с; $v - V = 2,6$ м/с

Было установлено существенное улучшение качества границы раздела между покрытием и основным материалом после электромеханической обработки. На участках поверхности покрытий, полученных ПНЭМО и ПНЭМОП, такая граница визуально становится слабо различимой, сливаясь со структурой основного металла (рис. 10).

Прочность соединения покрытия с основным металлом у образцов, выполненных способом ПНЭМО, в 2,9-3,2 и 1,12-1,23 раза выше, чем у ПН и ПНЭМОП, соответственно; микротвердость покрытия ПГСР-4, полученного ПНЭМО, составила 17486 МПа и была существенно выше, чем ПН – 12192 МПа и несколько превышала аналогичное значение у ПНЭМОП – 17200 МПа. Пористость покрытий, выполненных ПНЭМО и ПНЭМОП, в отличие от ПН,

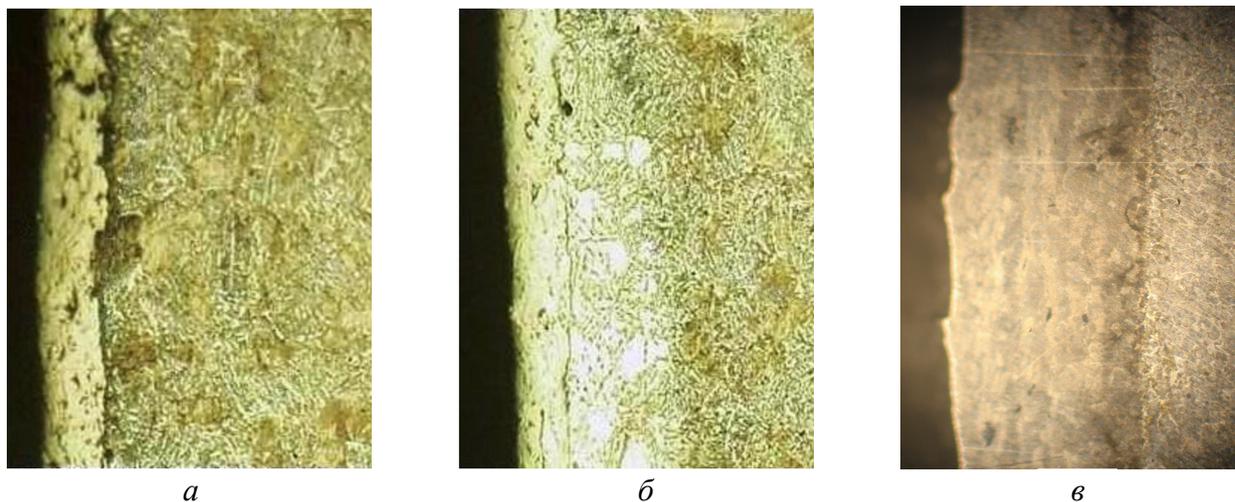


Рисунок 10 – Границы раздела между покрытием и основным металлом для покрытий, полученных по технологии: *а* – ТПН; *б* – ПНЭМОП; *в* – ПНЭМО

практически отсутствует. Предел выносливости у образцов с покрытиями ПНЭМО составил 245 МПа, что в 1,44 раза выше, чем у ПН – 170 МПа и примерно равен такому значению у ПНЭМОП. Рентгеноструктурным анализом установлен фазовый состав покрытий, полученных ПНЭМО и ПНЭМОП, включающий в себя твердый раствор на основе никеля, карбиды, оксиды, бориды, силициды.

Разработанный комбинированный способ ПНЭМО позволил устранить недостаток способа ПНЭМОП, связанный с его использованием для ограниченных по величине толщин покрытий и снизить затраты энергии за счет объединения в одной технологической операции процесса плазменного напыления и электромеханической обработки.

В пятом разделе помещено описание конструкции разработанного приспособления (рис. 11) для восстановления шеек коленчатых валов двигателей автомобилей КАМАЗ комбинированной технологией (патент РФ на полезную модель № 129021). Приведены обоснованные рекомендации для внедрения в производство усовершенствованного технологического

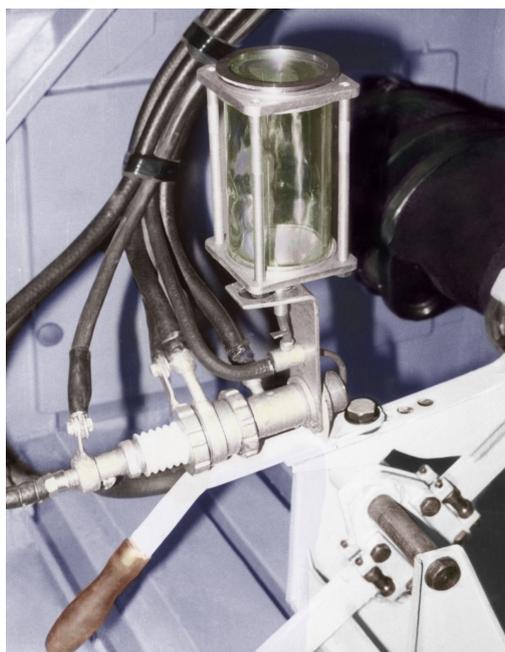


Рисунок 11 – Устройство для восстановления шеек коленчатых валов двигателей автомобилей КАМАЗ

процесса восстановления шеек коленчатых валов разработанным способом. Представлены методика проведения и результаты стендовых испытаний коленчатых валов двигателя КАМАЗ-740 на авторемонтном предприятии ОАО "172 ЦАРЗ". Испытания показали, что износостойкость покрытий полученных плазменным напылением с одновременной электромеханической обработкой на коренных шейках в 2,5; 1,41; 1,25, а на шатунных шейках и в 2,22; 1,22; 1,11 раза выше в сравнении с износостойкостью шеек новых коленчатых валов, восстановленных плазменным напылением с одновременной обработкой выносной импульсно модулируемой дугой плазматрона, плазменным напылением с последующей электромеханической обработкой, соответственно. Эксплуатационные испытания коленчатого вала двигателя КАМАЗ-740, восстановленного комбинированной технологией, были проведены в ЗАО "НСК ПЛЮС" и подтвердили его работоспособность в реальных условиях. В результате экономическая эффективность восстановле-

ния шеек коленчатых валов автомобильных двигателей КАМАЗ-740 по разработанной технологии при годовой программе 200 ед. в сравнение с технологией традиционного плазменного напыления с последующей электромеханической обработкой составила 164400 р.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Анализ состояния проблемы восстановления шеек коленчатых валов автомобильных двигателей показал, что в настоящее время используемые традиционные технологии все еще не обеспечивают требуемых производительности получения и качества покрытий. Для них характерны следующие основные недостатки, снижающие эксплуатационные свойства покрытий: низкие адгезионная и когезионная прочность, твердость и износостойкость, высокие остаточные напряжения, неоднородная структура, наличие пор, раковин и трещин, деформация валов и др. Эти недостатки объясняются отсутствием или несовершенством: новых эффективных способов восстановления и соответствующего оборудования; комплексного подхода исследования проблемы; математических моделей, имитационного моделирования и обоснованных на их основе оптимальных режимов и параметров, более совершенных технологических операций и процессов.

2 Предложен новый способ и разработано устройство для восстановления шеек коленчатых валов, позволяющие объединить в одном процессе две технологические операции – плазменного напыления и электромеханической обработки. Это позволяет устранить недостатки, характерные при выполнении каждой операции в отдельности и обеспечивает синергетический эффект при их объединении.

3 Разработанная математическая модель, выполненные имитационное моделирование и оптимизация основных параметров процессов, лежащих в основе технологических операций нового комбинированного способа восстановления шеек коленчатых валов двигателя КАМАЗ-740, позволили с помощью компьютерных экспериментов получить зависимости и исследовать влияние основных факторов процесса на критерии, а также оптимальные значения: расхода порошка – 18-25 г/ч; давление в зоне контакта – 50 МПа; плотности тока – 90-200 А/мм², при напряжении 3-5 В.

4 Разработанная математическая модель и выполненное имитационное моделирование процесса распространения тепла в коленчатом вале позволили с помощью компьютерных экспериментов исследовать и оценить эффективность пяти возможных вариантов охлаждения при плазменном нанесении покрытия. При этом установлено: водяное охлаждение существенно понижает температуру поверхности шеек, что способствует образованию более прочного покрытия вследствие уменьшения внутренних напряжений в покрытии; при новом комбинированном способе создания покрытия шеек коленчатого вала целесообразно использовать две водяные струи охлаждения – после прохода плазмотрона и обкатывающего ролика.

5 Результаты экспериментов показали существенное преимущество нового способа ПНЭМО: прочность соединения покрытия с основным металлом образцов у способа ПНЭМО в 2,9-3,2 и 1,12-1,23 раза выше, чем у ПН и ПНЭМОП, соответственно; микротвердость покрытия ПГСР-4, полученного ПНЭМО, составила 17486 МПа и была существенно выше, чем у ПН – 12192 МПа и несколько превышала аналогичное значение у ПНЭМОП – 17200 МПа. Пористость покрытий у ПНЭМО и ПНЭМОП, в отличие от ПН, практически отсутствует. Предел выносливости у образцов с покрытиями ПНЭМО составил 245 МПа, что в 1,44 раза выше, чем у ПН – 170 МПа и примерно равен такому значению у ПНЭМОП. Износостойкость покрытий, полученных способом ПНЭМО, на коренных шейках в 2,5; 1,41; 1,25 и на шатунных в 2,22; 1,22; 1,11 раза превышала износостойкость покрытий, полученных ПН и ПНЭМОП, соответственно.

6 В результате исследования были получены следующие обоснованные значения основных режимов и параметров технологического процесса восстановления шеек коленчатых валов новым

способом ПНЭМО: сила тока дуги – $I = 50$ А; расход плазмообразующего аргона – $Q_{пл} = 2,5$ л/мин; расход порошка – $m = 30$ г/ч; сила тока при электромеханической обработке – $I_{эмо} = 850$ А и напряжение – $U_{эмо} = 1,5$ В; давление в зоне контакта – 50 МПа.

7 Разработана, апробирована и внедрена конструкция универсального устройства для восстановления шеек коленчатых валов автомобильных двигателей, устанавливаемого на серийные токарно-винторезные станки. Положительной особенностью устройства является отсутствие необходимости использования центровместителей. Широкая номенклатура восстанавливаемых коленчатых валов обеспечивается за счет комплекта прилагаемых к установке сменных кулисных механизмов. Простое по конструкции и недорогое в изготовлении оно доступно для изготовления силами мастерских автотранспортных и авторемонтных предприятий.

8 Экономический эффект совершенствования технологии восстановления шеек коленчатых валов автомобильных двигателей по новому способу обеспечивается за счет улучшения эксплуатационных свойств, выражающийся в повышении безотказной работы на 8,1 %, а также снижении на 19 % удельных производственных расходов на восстановление коленчатых валов, в сравнении с наилучшим из традиционных способов. Годовой экономический эффект от внедрения мероприятий по совершенствованию технологии восстановления шеек коленчатых валов автомобильных двигателей плазменным напылением с одновременной электромеханической обработкой, при годовой программе 200 ед., составил 164400 рублей.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России

1 Посметьев, В. И. Управление качеством плазменных покрытий деталей машин на основе модуляции параметров плазмотрона и электромеханической обработки [Текст] / В. И. Посметьев, А. М. Кадырметов, В. О. Никонов, А. Ф. Мальцев // Мир транспорта и технологических машин. – 2011. – № 4 (35). – С. 23-29.

2 Кадырметов, А. М. Моделирование процесса плазменного напыления покрытий на детали транспортных машин в режиме модуляции мощности дуги плазмотрона / А. М. Кадырметов, М. В. Драпалюк, В. И. Посметьев, В. О. Никонов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар : КубГАУ, 2012. – № 10 (84).

3 Кадырметов, А. М. Оценка качества плазменных покрытий, нанесенных комбинированным методом с обкаткой роликом, полученная на основе компьютерного моделирования / А. М. Кадырметов, В. И. Посметьев, В. О. Никонов, В. В. Посметьев // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар : КубГАУ, 2013. – № 03 (87).

4 Кадырметов, А. М. Технологические перспективы и возможности процессов плазменного нанесения и упрочнения покрытий [Текст] / А. М. Кадырметов, С. И. Сушков, В. О. Никонов // Строительные и дорожные машины. – 2013. – № 7. – С. 25-33.

5 Кадырметов, А. М. Компьютерное моделирование распространения тепла в детали в комбинированном процессе плазменного напыления и упрочнения покрытия / А. М. Кадырметов, В. О. Никонов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар : КубГАУ, 2013 – № 04 (88).

6 Кадырметов, А. М. Особенности процесса плазменного напыления с электромеханической обработкой покрытий / А. М. Кадырметов, М. В. Драпалюк, В. О. Никонов, А. Ф. Мальцев // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государ-

ственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар : КубГАУ , 2013 – № 05 (89).

7 Никонов, В. О. Теоретическая оптимизация параметров процесса нанесения покрытия плазменным напылением с одновременной электромеханической обработкой / В.О. Никонов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар : КубГАУ, 2013. – № 07 (091).

Патенты и свидетельства

8 Пат. 2480533 РФ, МПК С23С4/18, В24В39/06, В23Н9/00. Способ комбинированного упрочнения поверхностей деталей [Текст] / А. М. Кадырметов, Г. А. Сухочев, В. И. Посметьев, В. О. Никонов, В. В. Посметьев, А. Ф. Мальцев ; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Доступная робототехника" – № 2011140996/02 ; заявл. 11.10.2011 ; опублик. 27.04.2013, Бюл. № 12. – 8 с.

9 Патент на полезную модель 129021 РФ, МПК В05В13/04. Устройство для нанесения покрытий на шатунные и коренные шейки коленчатых валов [Текст] / В. И. Посметьев, А. М. Кадырметов, В. О. Никонов, А. С. Пустовалов ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО ВГЛТА. – № 2012156454/05 ; заявл. 26.12.2012 ; опублик. 20.06.2013 ; Бюл. № 17.

10 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа для моделирования способа комбинированного упрочнения поверхностей деталей [Текст] / В. О. Никонов, А. М. Кадырметов, В. И. Посметьев, В. В. Посметьев ; правообладатель ФГБОУ ВПО ВГЛТА. – № 2013612101; заявл. 21.12.2012 ; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 14.02.2013.

11 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа для моделирования плазменного нанесения покрытия [Текст] / В. О. Никонов, А. М. Кадырметов, В. И. Посметьев, В. В. Посметьев ; правообладатель ФГБОУ ВПО ВГЛТА. – № 2013612100 ; заявл. 21.12.2012 ; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 14.02.2013.

12 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа для исследования эффективности способа комбинированного упрочнения плазменных покрытий [Текст] / А. М. Кадырметов, В. О. Никонов, В. И. Посметьев, В. В. Посметьев ; правообладатель ФГБОУ ВПО ВГЛТА. – № 2013615055 ; заявл. 17.04.2013 ; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 27.05.2013.

13 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа для моделирования тепловых процессов в деталях машин при комбинированном способе нанесения покрытий [Текст] / А. М. Кадырметов, В. О. Никонов, В. И. Посметьев, В. В. Посметьев ; правообладатель ФГБОУ ВПО ВГЛТА. – № 2013615740 ; заявл. 24.04.2013 ; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 19.06.2013.

Статьи и материалы конференций

14 Кадырметов, А. М. Оценка эффективности охлаждения детали при способе комбинированного нанесения плазменного покрытия [Текст] / А. М. Кадырметов, В. О. Никонов, В. В. Посметьев, А. Ф. Мальцев, Е. В. Снятков // XVII-ой международной научно-технической интернет-конференции «Новые материалы и технологии в машиностроении» г. Брянск., 2013. – С. 38-43.

15 Кадырметов, А. М. Компьютерное моделирование комбинированного процесса плазменного напыления покрытия с одновременной механической или электромеханической обработкой [Текст] / А. М. Кадырметов, В. О. Никонов, М. В. Драпалюк, В. В. Посметьев, А. С. Пустовалов // Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта : теория и практика : В 2 частях : материалы 15-й международной научно-практической конференции. Часть 1 – СПб :

Изд-во политехн. ун-та, 2013. – С. 85-92.

16 Кадырметов, А. М. Перспективы упрочнения покрытий методом плазменного напыления с одновременной электромеханической обработкой [Текст] / А. М. Кадырметов, В. О. Никонов, В. Н. Бухтояров, Е. В. Снятков, А. Ф. Мальцев // Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта : теория и практика : В 2 частях : материалы 14-й международной научно-практической конференции. Часть 1 – СПб : Изд-во политехн. ун-та, 2012. – С. 75-79.

17 Никонов, В. О. Разработка способа восстановления деталей машин плазменным напылением с одновременной электромеханической обработкой [Текст] / В. О. Никонов, В. И. Посметьев, А. М. Кадырметов, А. Ф. Мальцев // Проблемы науки, техники и образования в современном мире : сборник научных трудов по материалам Международной заочной научно-практической конференции 30 ноября 2012 г. Липецк, Липецкая областная общественная организация Всероссийского общества изобретателей и рационализаторов, 2012. – С. 121-122.

18 Никонов, В. О. Разработка комбинированного способа нанесения и упрочнения покрытий [Текст] / В. О. Никонов // Инновационные разработки молодых ученых Воронежской области на службу региона : сборник докладов Региональной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Воронеж, 16-17 апреля 2012 г. / Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере ; Прав. Вор.обл. ; ВИТЦ. – Воронеж, 2012. – С. 148-149.

19 Посметьев, В. И. Свойства покрытий, упрочненных плазменным напылением с одновременной электромеханической обработкой [Текст] / В. И. Посметьев, А. М. Кадырметов, В. О. Никонов, А. С. Пустовалов // Воронежский научно-технический вестник – 2013. – № 1 (3) – С. 34-41.

20 Посметьев, В. И. Результаты имитационного моделирования упрочнения поверхностей деталей автомобилей комбинированным способом [Текст] / В. И. Посметьев, А. М. Кадырметов, В. О. Никонов // Воронежский научно-технический вестник – 2013. – № 2 (4) – С. 66-74.

21 Никонов, В. О. Результаты моделирования тепловых процессов в деталях машин при комбинированном способе нанесения покрытия [Текст] / В. О. Никонов // Воронежский научно-технический вестник – 2013. – № 2 (4) – С. 128-131.

Подписано в печать 29.10.13.

Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 1,16. Тираж 100 экз.

Заказ

Издательство

Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.
600000, г. Владимир, ул. Горького, 87.