



05.22.10 – эксплуатация автомобильного транспорта

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРСПЕКТИВНОЙ КОМБИНИРОВАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ШЕЕК КОЛЕНЧАТЫХ ВАЛОВ ДВИГАТЕЛЕЙ ЛЕСОВОЗНЫХ АВТОПОЕЗДОВ**

**Посметьев Валерий Иванович**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры машиностроительных технологий ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, РФ

**Кадырметов Анвар Минирович**

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой машиностроительных технологий ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, РФ

✉<sup>1</sup>**Никонов Вадим Олегович**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры производства, ремонта и эксплуатации машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, РФ  
e-mail: 8888nike8888@mail.ru

**Аннотация.**

Рассмотрены негативные последствия эксплуатации лесовозных автопоездов в сложных дорожных и природно-климатических условиях. Установлено, что наибольшая доля отказов при эксплуатации лесовозного автопоезда приходится на его двигатель. Описаны возможные дефекты коленчатого вала, способствующие выходу из строя двигателя лесовозного автопоезда. Обоснована целесообразность процесса восстановления коленчатых валов двигателей. Выполнен анализ результатов исследования зарубежных авторов в области разработки и совершенствования различных способов восста-

**EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF A PROMISING COMBINED TECHNOLOGY FOR RECOVERY OF CRANKSHAFT JOINTS OF ENGINES OF TIMBER TRUCKS**

**Posmetev Valerii Ivanovich**

doctor of technical sciences, professor, professor of the department of engineering technologies of the department of engineering technologies Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, RF

**Kadirmetov Anvar Minirovich**

doctor of technical sciences, associate professor, head of department of engineering technologies Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, RF

✉<sup>1</sup>**Nikonov Vadim Olegovich**

candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of production, repair and operation of cars Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, RF  
e-mail: 8888nike8888@mail.ru

**Annotation.**

The negative consequences of exploitation of logging road trains in difficult road and climatic conditions are considered. It has been established that the largest share of failures during the operation of a timber hauling train falls on its engine. Possible defects of the crankshaft, which contribute to the failure of the engine of a logging road train, are described. The expediency of the process of restoration of crankshafts of engines is substantiated. The analysis of the results of the study of foreign authors in the field of development and improvement of various methods for restoring the main and connecting rod journals

новления коренных и шатунных шеек коленчатых валов двигателей. Выявлен среди них наиболее прогрессивный метод восстановления, заключающийся в плазменном нанесении покрытий заданных свойств на коренные и шатунные шейки коленчатых валов. С целью повышения эффективности получаемых покрытий плазменным напылением предложен комбинированный способ одновременного нанесения и упрочнения покрытия. Выполнена предварительная оценка на основе математического моделирования основных физико-механических свойств получаемых по такой технологии покрытий. Исследована износостойкость покрытий полученных на разработанной лабораторной установке по сравниваемым технологиям.

**Ключевые слова:** ЛЕСОВОЗНЫЙ АВТОПОЕЗД, ЛЕСОВОЗНАЯ ДОРОГА, КОМБИНИРОВАННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ, ПЛАЗМЕННОЕ НАПЫЛЕНИЕ, ПОКРЫТИЕ, ДВИГАТЕЛЬ, ШЕЙКИ КОЛЕНЧАТОГО ВАЛА, ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА.

of the crankshafts of engines is carried out. Among them, the most progressive method of restoration was revealed, which consists in the plasma deposition of coatings of specified properties on the main and connecting rod journals of the crankshafts. In order to increase the efficiency of the coatings obtained by plasma spraying, a combined method for the simultaneous deposition and hardening of the coating is proposed. A preliminary assessment was made on the basis of mathematical modeling of the main physical and mechanical properties of coatings obtained using this technology. The wear resistance of coatings obtained on the developed laboratory installation using compared technologies has been studied.

**Keywords:** TIMBER ROAD TRAIN, TIMBER ROAD, COMBINED RECOVERY TECHNOLOGY, PLASMA SPRAYING, COATING, ENGINE, CRANKSHAFT JOURNALS, ELECTROMECHANICAL PROCESSING.

<sup>1</sup> Автор для ведения переписки

### 1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Транспорт лесоматериалов выполняет важную связующую роль между производствами всей совокупности отраслей российской промышленности, осуществляющих заготовку и переработку древесины. Вывозка лесоматериалов лесовозным автомобильным транспортом является самым дорогостоящим и трудоемким процессом в лесопромышленном комплексе. Это связано с тем, что в данном процессе задействовано около половины работников предприятия. Доля транспортных расходов от общей конечной стоимости лесоматериалов составляет 45-48 %. В силу особой специфики работы массивных лесовозных автопоездов в процессе вывозки лесоматериалов, которая связана с частыми торможениями, разгонами, ресурс их агрегатов и, в частности двигателей значительно ниже нормативного. Это объясняется тем, что движение лесовозного автопоезда большую часть времени осуществляется по бездорожью или недостаточно обустроенным лесовозным дорогам, которые характеризуются наличием на них многочисленных дефектов, неровностей, препятствий, продольных и поперечных уклонов, а также опасных участков. Движение лесовозного автопоезда по таким дорогам сопровождается снижением его скорости на 50-52 %, воздействием на его подвеску, раму и трансмиссию больших динамических и ударных нагрузок, а также вследствие высоких значений коэффициентов сопротивления, работой в неустановившихся тяжелых режимах нагружения его тормозной системы, двигателя, сцепления, коробки передач и раздаточной коробки. Так, оборотность двигателя лесовозного автопоезда при движении в сложных дорожных условиях возрастает в 3-3,5 раза, количество включений и выключений муфты сцепления увеличивается в 10 раз, частота переключения коробки передач возрастает в 5 раз. Установлено, что в условиях движения лесовозного автопоезда по магистральным дорогам

доля работы двигателя в неустановившихся режимах составляет 34 %, а в условиях движения по лесовозным дорогам, при малых расстояниях вывозки, частых торможений, троганиях и поворотах – 94 % и более. Большое количество преодолеваемых лесовозным автопоездом поворотов и неровностей, имеющихся на лесовозной дороге, способствует более интенсивному использованию коробки переключения передач, муфты сцепления и значительному изменению частоты оборотов коленчатого вала. Это приводит к перегреву, а также к значительному износу и возникновению отказов двигателя.

Недостаточная обустроенность лесовозных дорог является причиной повышения затрат, расходуемых на осуществление технического обслуживания и текущего ремонта лесовозных автопоездов. Эксплуатация лесовозных автопоездов в сложных дорожных условиях сопровождается увеличением в 2-6 раза количества отказов по сравнению с эксплуатацией лесовозных автопоездов в нормальных дорожных условиях. Кроме этого, преждевременный выход из строя лесовозных автопоездов, а также снижение ресурса их агрегатов почти в 1,5 раза связано со значительной удаленностью от ремонтных баз, ограниченной возможностью пользования базовыми пунктами технического обслуживания, недостаточным материально-техническим оснащением последних, а также недостаточной квалификацией обслуживающего персонала. Это приводит к низкому технологическому уровню и неудовлетворительному качеству обслуживания и ремонта лесовозных автопоездов, в связи с чем, они вынуждены простаивать в процессе ожидания ремонта. Дополнительно к этому, прослеживается тенденция недоиспользования ресурса на 35-55 % некоторых агрегатов лесовозных автопоездов в связи со снятием и отправлением их в ремонт раньше положенного срока [1-5].

Среди всех эксплуатационных отказов, выявленных за исследуемый период времени в основных системах и агрегатах лесовозного автомобиля КАМАЗ-65115, установлено, что наибольшая доля отказов, равная 14,35 %, приходится на его двигатель. Одной из основных причин возникновения в двигателе отказов, сопровождающихся его ремонтом, является износ деталей кривошипно-шатунного механизма, в частности коренных и шатунных шеек коленчатого вала. Доля отказов, приходящаяся на кривошипно-шатунный механизм, составляет более 25 %. Износ коренных и шатунных шеек коленчатого вала возникает при высоких значениях удельных поверхностных нагрузок на них, при знакопеременном и циклическом воздействии, а также при проворачивании вкладышей в постелях шатунных подшипников. Кроме этого, наиболее часто проявляющимися в процессе эксплуатации лесовозных автопоездов дефектами коленчатых валов их двигателей, являются: износ резьбы; овальность, конусность, бочкообразность, шеек; износ посадочного места наружного кольца шарикоподшипника в торце вала; трещины на щеках, шейках; вмятины, риски, и задиры на шейках; торцовое биение фланца маховика, скручивание вала; изгиб вала; усталостные трещины шатунных и коренных шеек; износ посадочных мест под шкив, распределительную шестерню, маховик; засорение масляных каналов продуктами износа масла; износ маслосгонной резьбы; износ отверстий под штифты крепления; износ и разбивка шпоночных канавок; срыв ниток резьбы; коррозия трущихся поверхностей. Восстановление изношенных деталей лесовозных автопоездов, является важным резервом повышения эффективности их использования. Наиболее частыми причинами, на основании которых осуществляется выбраковка коленчатых валов двигателей лесовозных автопоездов, является наличие на коренных и шатунных шейках трещин. Утилизировать изношенные коленчатые валы, пригодные для восстановления неразумно, так как они обладают высокой добавленной стоимостью, на которую приходится 5-15 % стоимости всего лесовозного автопоезда. К тому же процесс восстановления изношенных коленчатых валов двигателей лесовозных автопоездов является ресурсосберегающим процессом. Восстановление шеек коленчатых валов двигателей является трудоемким и дорогостоящим процессом, при осуществлении которого предъявляются высокие требования к качеству и геометрическим параметрам восстановленных рабочих поверхностей коренных и шатунных шеек двигателя [6-7].

Коленчатый вал является самой сложной и дорогой в изготовлении деталью, от которого во многом зависят его эксплуатационные характеристики и долговечность двигателя. Ресурс нового коленчатого вала двигателя лесовозного автопоезда в большинстве случаев превышает ре-

сурс восстановленного.

Разработка новых прогрессивных технологических процессов восстановления коленчатых валов двигателей автомобилей, а также усовершенствование существующих способов, обеспечивающих заданный ресурс двигателя, за счет создания на поверхностях их коренных и шатунных шеек износостойких покрытий, высокую экономическую эффективность двигателя, является в настоящее время актуальной задачей. Перспективность данного научного направления, связанного с разработкой и исследованием различных способов восстановления шеек коленчатых валов подтверждается результатами исследований, представленных в научных статьях многих зарубежных авторов.

Alfares M. A. и др. [8] в своей работе исследовали дефекты коленчатых валов двигателей автомобилей, изготовленных из кованной и азотированной стали. Шлифовка шеек коленчатых валов в ремонтный размер выполнялась в соответствии с требованиями завода производителя двигателей через каждые 300 тыс. км. Ресурс коленчатых валов после шлифовки коренных и шатунных шеек составил от 15 тыс. км пробега лесовозного автопоезда. В результате исследования преждевременных причин отказов коленчатых валов двигателей автомобилей в лабораторных условиях на основании методов электронной микроскопии с электронно-дисперсионным рентгеновским анализом, а также измерением градиентов твердостей и микротвердостей азотированного слоя вблизи излома коленчатого вала, установлено, что отказ наступил из-за усталостного разрушения в области галтели при появлении трещины в результате перешлифовки шеек в ремонтный размер. Авторы рекомендуют для предотвращения усталостного разрушения коленчатого вала в области галтелей выполнять более качественно контроль в процессе окончательной шлифовки, во избежании значительного удаления азотированного слоя.

Chenmin Zhao и др. [9] в своей работе рассмотрели актуальность восстановления шеек коленчатых валов двигателей лазерной наплавкой. Данная технология характеризуется минимальным термическим воздействием на деталь, а также высокими эксплуатационными характеристиками поверхностей обработанных по такой технологии деталей. Разработана теоретическая основа для контроля формирования и прогнозирования двухслойных покрытий, наносимых на поверхность шеек коленчатых валов лазерной наплавкой.

Ozturk A. A. и др. [10] в своей работе исследовали износ шеек коленчатого вала двигателя грузового автомобиля Mercedes OM 355, восстановленных наплавкой под слоем флюса, с использованием различных по химическому составу материалов. Выявлено различие в твердости шеек коленчатого вала восстановленного по рассматриваемой технологии с использованием различных материалов в зоне наплавки и в основном металле. Установлено, что большей износостойкостью обладают материалы с мелкозернистой структурой в сравнении с крупнозернистой, а также с более высоким содержанием углерода, марганца и хрома.

Haung H. и др. [11] в своем исследовании выполнили оценку качества ремонта коленчатого вала двигателя автомобиля, после его восстановления коренных и шатунных шеек методом плазменной наплавки. Предварительно были определены оптимальные параметры процесса, обеспечивающие необходимые физико-механические свойства покрытия (твердость и износостойкость). Установлено, что скорость подачи порошка является наиболее существенным фактором, оказывающим влияние на микротвердость и потерю объема наносимого покрытия, а также на его износостойкость. Оптимальные параметры процесса, это ток сварки – 100 А, скорость сварки – 70 мм / мин, скорость подачи порошка – 22 г/мин. Среднее значение микротвердости нанесенного покрытия составило 560 HV, среднее значение коэффициента трения – 0,41, объем износа –  $5,02 \times 10^{-3}$  мм<sup>3</sup>. Такие физико-механические свойства обеспечивают повышение износостойкости покрытия. Результаты дефектации восстановленных рассматриваемой технологией шеек коленчатых валов двигателей показали отсутствие явных дефектов и высоких остаточных напряжений, что подтверждает высокое качество ремонта.

N. M. Al-Araji и др. [12] в своей работе исследовали технологию восстановления шеек

коленчатых валов двигателей дуговой сваркой под слоем флюса. В исследовании было задействовано шесть изношенных коленчатых валов различных двигателей Daihatsu-B, Defender TDI и Rover 110. Перед нанесением покрытия они были должным образом очищены, проверены на наличие возможных дефектов и подготовлены к процессу восстановления. Выявлено, что физико-механические свойства нанесенного рассматриваемым методом на шейки коленчатого вала покрытия зависят от: предварительного и последующего нагрева коленчатых валов в процессе восстановления, уровня дефектации и подготовки к восстановлению, химического состава сварочного электрода и флюса, технологических параметров процесса. Установлено, что большей износостойкостью обладают исследуемые образцы с нанесенным по предлагаемой технологии покрытием в сравнении с образцами без покрытия.

Yasutoshi Tomimaga и др. [13] в своей работе исследовали перспективный метод поверхностного упрочнения шеек коленчатого вала двигателей в процессе его окончательной обработки после поверхностного шлифования на глубину 0,2 мм. Данный метод заключается в обработке поверхности шеек коленчатого вала ультразвуковым устройством с шариком на конце, изготовленным из карбида вольфрама диаметром от 1 до 55 мм. В процессе такой ультразвуковой обработки шарик ударяется о поверхность шейки коленчатого вала до 40 тыс. раз в секунду. Это способствует по аналогии с микрохолодной ковкой пластической и упругой деформации обрабатываемой поверхности и созданию на ее поверхности нанокристаллической структуры с глубокими сжимающими остаточными напряжениями. Использование данной технологии позволяет восстановить первоначальную усталостную прочность, а также трибологические свойства поверхности шеек коленчатого вала.

Zhang Guo-qing и др. [14] в своей работе выполнили прогнозирование долговечности коленчатых валов, коренные и шатунные шейки которых были восстановлены по технологии двухдуговой наплавки. Усталостная долговечность оценивалась на основании динамического моделирования и анализа методом конечных элементов. Результаты прогнозирования, полученные на основании традиционного расчета и динамического моделирования, показали, что срок службы коленчатого вала, восстановленного рассматриваемой технологией обладает высокой адекватностью.

George Mahu и др. [15] в своей работе на основе методов динамической поляризации и микроструктурного анализа исследовали коррозионную стойкость нанесенных покрытий методом плазменного напыления на коренные и шатунные шейки коленчатого вала двигателя. На поверхность шеек коленчатого вала напыляли три вида порошков:  $Al_2O_3-13TiO_2$ ,  $Cr_2O_3-SiO_2-TiO_2$ . Коррозионная стойкость исследовалась в 3,5 % растворе NaCl. Полученные результаты подтвердили обеспечение высокой коррозионной стойкости нанесенных плазменным напылением покрытий, что способствует повышению срока службы коленчатого вала двигателя.

V.V. Le и др. [16] в своей работе рассматривают актуальность и преимущества использования технологии плазменного напыления покрытий для восстановления шеек коленчатых валов двигателей. Подробно рассмотрен технологический процесс подготовки материала наносимого порошка и поверхности шеек коленчатого вала перед нанесением покрытия, а также операция нанесения покрытия плазменным напылением и заключительная операция – диффузионный отжиг. Приведены технологические параметры восстановления шеек коленчатого вала плазменным напылением. Выявлено, что предварительная термообработка, осуществляемая перед нанесением покрытия, позволяет повысить адгезионную прочность, а также снизить износ покрытия.

A. R. Yusufova и др. [17] в своей работе предлагают для повышения адгезионной и когезионной прочности покрытий нанесенных на шейки коленчатого вала плазменным напылением, увеличения их срока службы и снижения затрат на осуществление процесса, использовать детанационные волны, магнитное поле, а также интенсивное диффузионное насыщение при использовании специализированной металлической смазки с легкоплавкими добавками.

Учитывая опыт зарубежных исследователей, можно сделать вывод, что наибольшую распространенность в настоящее время приобрела технология восстановления коленчатых валов двигателей автомобилей, заключающаяся в плазменном нанесении покрытий на изношенные корен-

ные и шатунные шейки. Такая ситуация связана с простотой и возможностями данной технологии, которая позволяет с высокой производительностью напылять в процессе восстановления шеек коленчатых валов различные материалы покрытий, не оказывая значительного термического воздействия на основной материал детали. Кроме этого данная технология может быть полностью автоматизирована. Помимо имеющихся у данной технологии преимуществ, эффективность данного процесса восстановления шеек коленчатых валов плазменным напылением можно дополнительно повысить путем улучшения физико-механических свойств полученных покрытий различными способами упрочнения. Для этого, авторами разработан перспективный комбинированный способ восстановления коренных и шатунных шеек коленчатых валов двигателей лесовозных автопоездов, заключающийся в одновременном нанесении покрытия плазменным напылением и его упрочнением электромеханической обработкой [18].

Целью исследования в данной статье является оценка на основе компьютерного моделирования и лабораторных экспериментов эффективности перспективной комбинированной технологии для дальнейшей разработки технологического процесса восстановления коренных и шатунных шеек коленчатого вала лесовозного автопоезда.

## 2 Материалы и методы

Разработанная для исследования физическая модель объекта включает в себя три процесса: процесс плазменного напыления, процесс электромеханической обработки и процесс охлаждения струями воды [18, 19]. Одновременность плазменного напыления и электромеханической обработки создает условия, при которых покрытие попадает в зону обработки роликом в подогретом пластичном состоянии, что устраняет возможность его растрескивания. На основе физической модели была разработана математическая модель объекта исследования для полуограниченного тела. Ввиду его сложности математическая модель состоит из уравнений и формул для расчета: взаимодействия и движения дискретных элементов покрытия, кинетической энергии дискретного элемента, теплообмена между контактирующими дискретными элементами покрытия, уравнений для представления ролика в модели, электропроводности между дискретными элементами покрытия с поверхностью. Кроме этого модель состоит из начальных, граничных условий и допущений, которые были приняты при разработке модели.

Поверхность, на которую осуществлялось нанесение покрытия, представляется в двумерном пространстве, как прямая  $y = 0$ , которая ограничивает движение наносимых элементов покрытия по направлению вниз, изменяет их скорость перемещения и температуру, а также способствует передаче элементам электрического потенциала. При взаимодействии  $i$ -го элемента наносимого покрытия на поверхность, он испытывает действие дополнительной вязкоупругой силы, которая определяется по следующим формулам [4, 5]:

$$F_{xiII} = k_B v_{xi} (y_i - d_i / 2); \quad (1)$$

$$F_{yiII} = c(y_i - d_i / 2) + k_B v_{yi} (y_i - d_i / 2). \quad (2)$$

где  $c$  – коэффициент жесткости упругого взаимодействия между элементами покрытия.

Теплопередача, осуществляемая между поверхностью на которую наносят покрытие и  $i$ -м элементом определяется по следующей зависимости:

$$T_i^{k+1} = T_i^k + \Delta t \cdot \chi_{iII} \frac{T_j^k - T_{II}^k}{d_i / 2 - y_i}, \quad (3)$$

где  $T_{II}^k$  – температура поверхности, которую напыляют покрытие, рассчитанная на  $k$ -м шаге интегрирования;  $\chi_{iII}$  – коэффициент теплопроводности между поверхностью и  $i$ -м элементом.

Вязкая сила, описываемая взаимное проникновение элементов  $i$  и  $j$  друг в друга определяется в соответствии с зависимостями (4) и (5):

$$F_{xij}^B = k_B (r_{ij} - (d_{\text{э}} + d_o))(v_{xi} - v_{xj}); \quad (4)$$

$$F_{yij}^B = k_B (r_{ij} - (d_{\text{э}} + d_o))(v_{yi} - v_{yj}), \quad (5)$$

где  $k_B$  – коэффициент вязкого трения;  $v_{xi}$ ,  $v_{yi}$  – декартовы составляющие скоростей  $i$ -го элемента;  $v_{xj}$ ,  $v_{yj}$  – декартовы составляющие скоростей  $j$ -го элемента.

Зависимость, характеризующая движение  $i$ -го элемента имеет следующий вид:

$$m_{\text{э}} \frac{d^2 x_i}{dt^2} = \sum_{j=1}^{N_{\text{э}}} (F_{xij}^V + F_{xij}^B); \quad (6)$$

$$m_{\text{э}} \frac{d^2 y_i}{dt^2} = \sum_{j=1}^{N_{\text{э}}} (F_{yij}^V + F_{yij}^B), \quad (7)$$

где  $t$  – время;  $m_{\text{э}}$  – масса элемента.

Изменение расположения ролика в пространстве описывается выражениями (8) и (9):

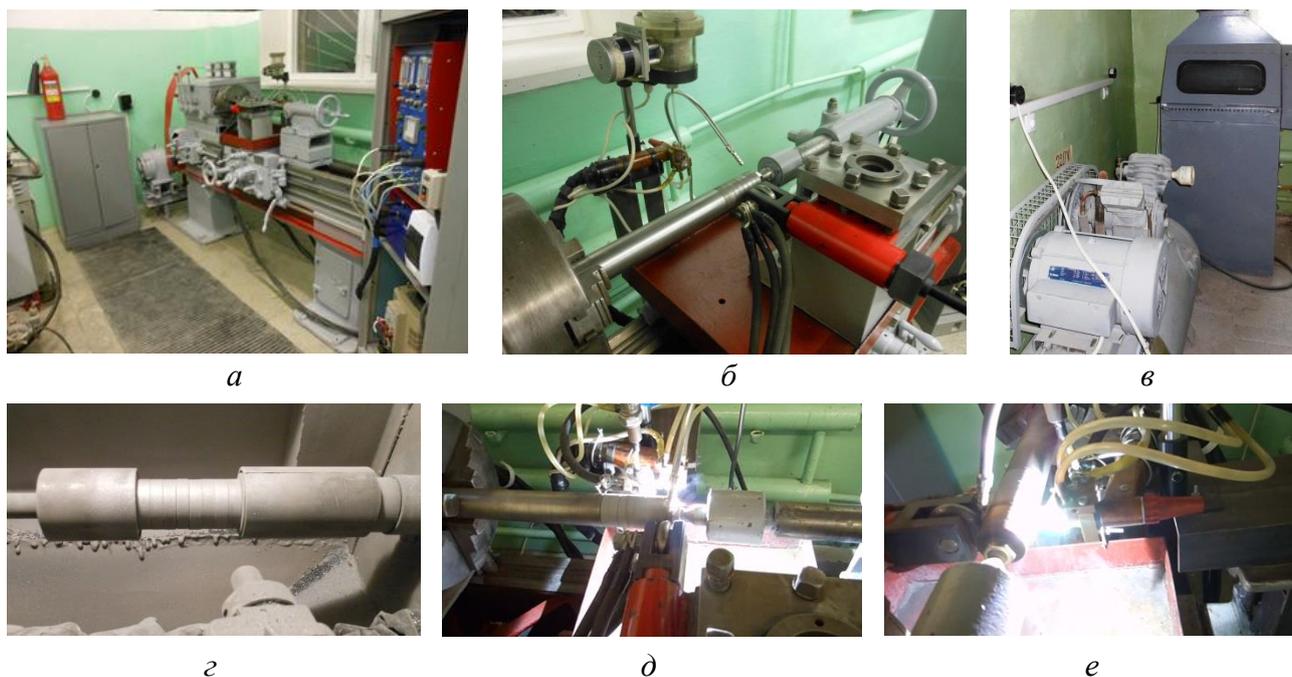
$$x_i = x_{\text{ЦР}} + R_p \cdot \cos \left( \omega_p t + \frac{2\pi i}{N_{\text{ЭР}}} \right), \quad i = 1 \dots N_{\text{ЭР}}; \quad (8)$$

$$y_i = y_{\text{ЦР}} + R_p \cdot \sin \left( \omega_p t + \frac{2\pi i}{N_{\text{ЭР}}} \right), \quad i = 1 \dots N_{\text{ЭР}}, \quad (9)$$

где  $x_{\text{ЦР}}$  и  $y_{\text{ЦР}}$  – координаты центра ролика;  $R_p$  – радиус ролика;  $\omega_p$  – угловая скорость вращения ролика;  $N_{\text{ЭР}}$  – количество элементов, представляющих поверхность ролика [4, 5].

Для удобства моделирования разработаны имитационные модели [20, 21]. Реализация имитационной модели осуществлялась на языке Object Pascal в интегрированной среде программирования Borland Delphi 7. Данная модель позволяет исследовать влияние большого количества факторов на критерии процесса и наглядно проследить за изменением структуры покрытия, распределением электрического тока в покрытии при обработке роликом. Последовательность проведения компьютерного эксперимента включала в себя нанесение и упрочнение двух слоев покрытия, после чего выполнялась оценка физико-механических свойств сформировавшегося покрытия.

Далее на основании разработанной методики исследования в лабораторных условиях с помощью изготовленного и собранного авторами экспериментального оборудования (рис. 1) были нанесены плазменным напылением и упрочнены электромеханической обработкой по предлагаемой технологии рабочие поверхности трения серий образцов. Для исследования физико-механических, а также триботехнических свойств, полученных по сравниваемым технологиям покрытий использовались: методика исследования прочности нанесенного и упрочненного покрытия с основным металлом образца на сдвиг, методика определения микротвердости покрытия при помощи вдавливания алмазного наконечника, методика измерения плотности покрытия при помощи гидростатического взвешивания, методика определения фазового состава покрытия путем металлографического и рентгеноструктурного анализов, методика испытания образцов на усталость, методика испытания образцов на износ в условиях абразивно-масляной среды.



*а, б, в* – общий вид установки; *г* – пескоструйная обработка лабораторных образцов; *д, е* – процесс одновременного нанесения покрытия плазменным напылением и упрочнения покрытия электромеханической обработкой

Рисунок 1 – Установка для нанесения покрытий комбинированным способом

### 3 Результаты исследования

С помощью разработанной имитационной модели были проведены серии компьютерных экспериментов и получены зависимости плотности  $\rho$ , шероховатости  $R_q$ , когезии  $\sigma_{ког}$  и остаточных напряжений  $\sigma_{ост}$  от расхода порошка  $Q_{II}$ , давления обкатки роликом  $P_p$ , плотности тока  $j$  в пятне контакта покрытия и обкатывающего ролика (рис. 2-7).

Выявлено повышение плотности покрытия  $\rho$  с ростом расхода порошка  $Q_{II}$  (рис. 2-4). Это объясняется тем, что при недостаточном расходе порошка  $Q_{II}$  напыляемые частички порошка создают островковую структуру покрытия. С ростом же расхода порошка  $Q_{II}$  сплошность напыляемых частичек порошка возрастает. Увеличение плотности покрытия  $\rho$  от 4-6 % прослеживается после обкатки покрытия роликом. Также обкатка роликом способствует снижению параметров шероховатости поверхности покрытия в диапазоне от 40 до 70 %. Наблюдается также, что с увеличением расхода порошка  $Q_{II}$ , в условиях одинакового усилия, прикладываемого к ролику, шероховатость  $R_q$  поверхности покрытия увеличивается незначительно. Это связано с ростом высоты неровностей при увеличении толщины наносимого покрытия. Обнаружено снижение когезионной прочности покрытия  $\sigma_{ког}$  при обкатке его роликом. Такой эффект проявляется при значении расхода порошка от 2,5 до 6 мг/ за счет которого возрастает толщина покрытия, и, следовательно, увеличиваются остаточные растягивающие напряжения в нем. Аналогичный эффект прослеживается при обкатке роликом при том же расходе порошка со значениями остаточных напряжений  $\sigma_{ост}$ . При пропускании электрического тока через обкатывающий ролик происходит повышение силы когезии  $\sigma_{ког}$ . Обкатка роликом покрытия без пропускания через него электрического тока дает возможность снизить шероховатость  $R_q$ , увеличить плотность покрытия  $\rho$ , однако, при этом происходит ухудшение когезии  $\sigma_{ког}$ , а также возрастание внутренних напряжений в покрытии  $\sigma_{ост}$ . Выполнение обкатки покрытия роликом с пропусканием через него электрического тока да-

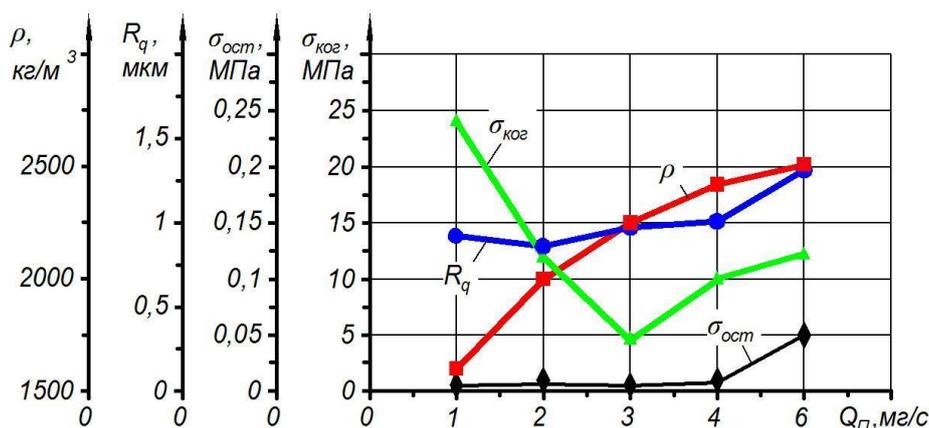


Рисунок 2 – Зависимости изменения величины остаточных напряжений  $\sigma_{ост}$ , когезионной прочности покрытия  $\sigma_{ког}$ , шероховатости поверхности  $R_q$  и плотности образующего покрытия  $\rho$  от увеличения расхода порошка  $Q_{п}$  в процессе плазменного напыления без обкатки роликом

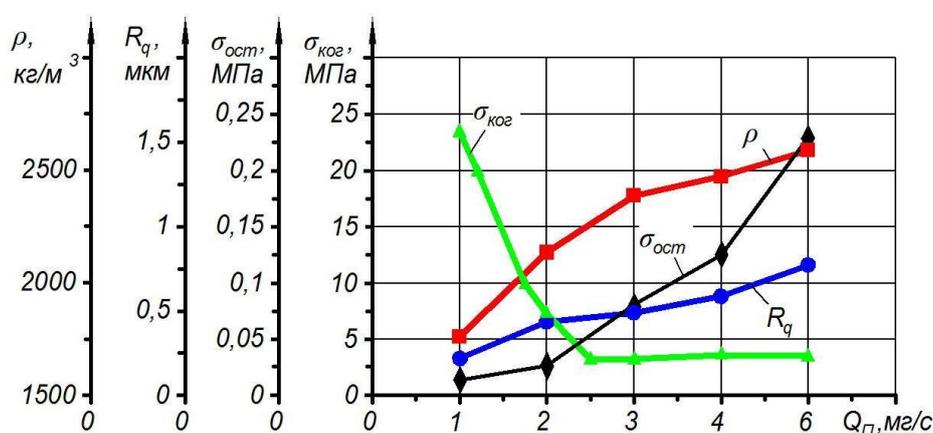


Рисунок 3 – Зависимости изменения величины остаточных напряжений  $\sigma_{ост}$ , когезионной прочности покрытия  $\sigma_{ког}$ , шероховатости поверхности  $R_q$  и плотности образующего покрытия  $\rho$  от увеличения расхода порошка  $Q_{п}$  в процессе плазменного напыления с обкаткой роликом без пропуска электрического тока

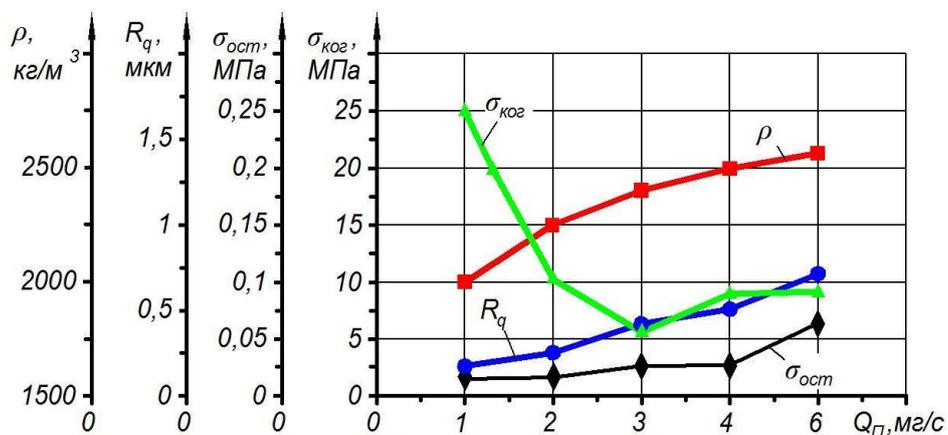


Рисунок 4 – Зависимости изменения величины остаточных напряжений  $\sigma_{ост}$ , когезионной прочности покрытия  $\sigma_{ког}$ , шероховатости поверхности  $R_q$  и плотности образующего покрытия  $\rho$  от увеличения расхода порошка  $Q_{п}$  в процессе плазменного напыления с электромеханической обработкой роликом

ет возможность уменьшить внутренние напряжения в покрытии  $\sigma_{ост}$ , а также еще значительнее снизить шероховатость  $R_q$  поверхности покрытия и увеличить его плотность  $\rho$ .

На основании зависимостей представленных на рисунках 5 и 6 можно заключить, что изменение давления обкатки роликом  $P_p$  не оказывает значительного влияния на когезионную прочность  $\sigma_{коз}$  и плотность нанесенного покрытия  $\rho$ . Также можно заметить, что с ростом давления обкатки до 3 МПа происходит уменьшение шероховатости  $R_q$  поверхности покрытия за счет приглаживания роликом выступающих частиц нанесенного покрытия. Остаточные напряжения  $\sigma_{ост}$  в покрытии при увеличении давления обкатки  $P_p$  роликом также значительно возрастают. Выполняя сравнение изменения исследуемых показателей при обкатке покрытия роликом без пропускания через него электрического тока и при пропускании через ролик электрического тока, можно заметить, во втором случае в процессе обкатки наблюдается сокращение остаточных напряжений  $\sigma_{ост}$  в покрытии почти в три раза, снижение шероховатости покрытия  $R_q$ , а также увеличение до 20 % когезии  $\sigma_{коз}$ .

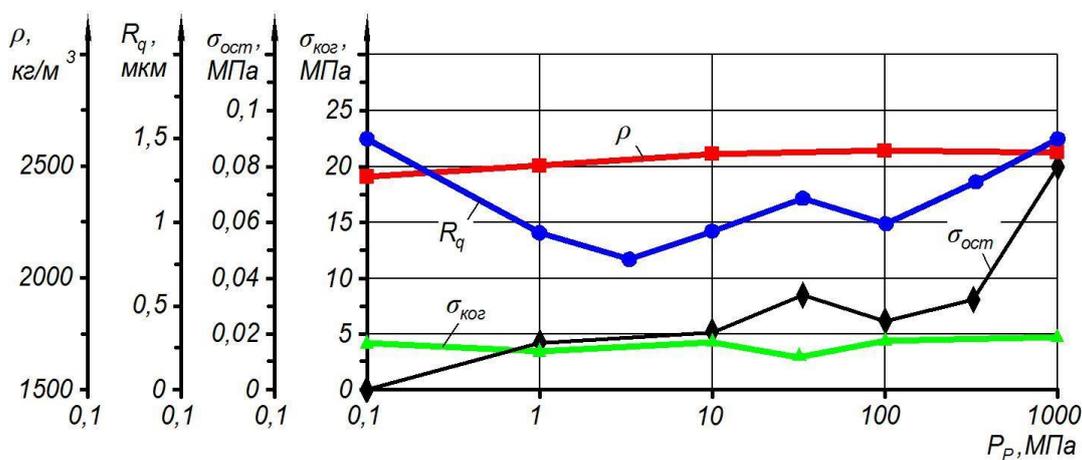


Рисунок 5 – Зависимости изменения величины остаточных напряжений  $\sigma_{ост}$ , когезионной прочности покрытия  $\sigma_{коз}$ , шероховатости поверхности  $R_q$  и плотности образующего покрытия  $\rho$  от увеличения давления обкатки ролика  $P_p$  в процессе обкатки роликом без пропускания электрического тока

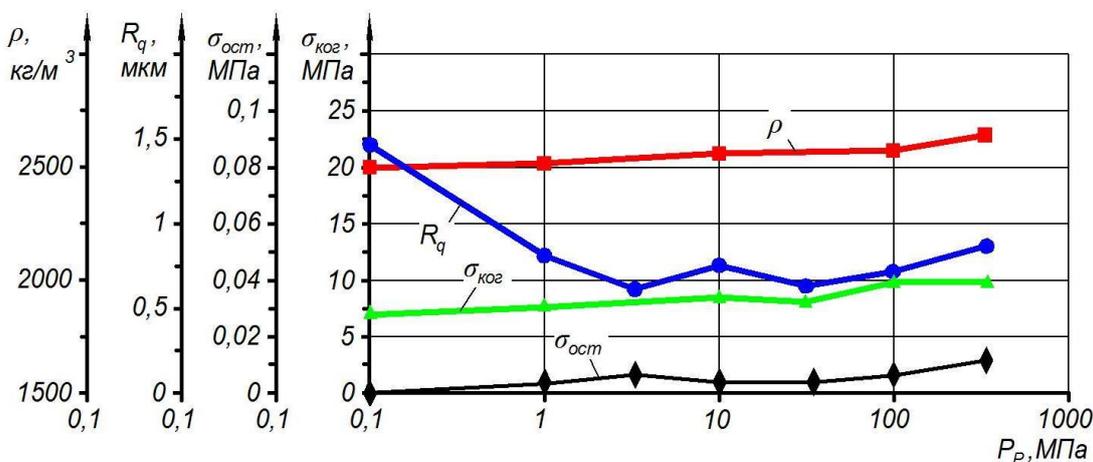


Рисунок 6 – Зависимости изменения величины остаточных напряжений  $\sigma_{ост}$ , когезионной прочности покрытия  $\sigma_{коз}$ , шероховатости поверхности  $R_q$  и плотности образующего покрытия  $\rho$  от увеличения давления обкатки ролика  $P_p$  в процессе электромеханической обработки роликом

При повышении плотности тока  $j$  (рис. 7) в процессе обкатке роликом происходит повышение плотности покрытия  $\rho$ . Это связано со сглаживанием роликом внутренних дефектов, имеющих в структуре нанесенного покрытия. Шероховатость же нанесенного покрытия при увеличении плотности тока  $j$  в диапазоне от 0 до 120 А/мм<sup>2</sup> уменьшается по причине выравнивания разогреваемой поверхности покрытия роликом. В диапазоне от 120 до 200 А/мм<sup>2</sup> происходит увеличение шероховатости поверхности покрытия  $R_q$  за счет его сильного разогрева, сопровождающегося частичным налипанием покрытия на обкатывающий ролик. При повышении плотности тока  $j$  в интервале от 0 до 100 А/мм<sup>2</sup> наблюдается рост когезионной прочности покрытия  $\sigma_{коз}$ . При изменении плотности тока  $j$  во всем исследуемом диапазоне наблюдается снижение остаточных напряжений  $\sigma_{ост}$ .

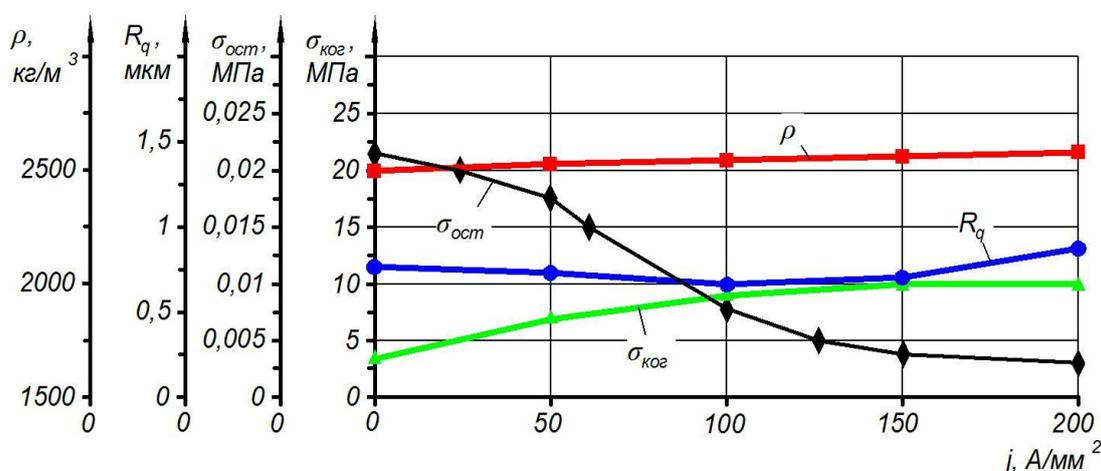


Рисунок 7 – Зависимости изменения величины остаточных напряжений  $\sigma_{ост}$ , когезионной прочности покрытия  $\sigma_{коз}$ , шероховатости поверхности  $R_q$  и плотности образующего покрытия  $\rho$  от плотности тока через покрытие  $j$  в процессе электрохимической обработки роликом

Для определения с помощью программы для ЭВМ оптимальных параметров предлагаемого технологического процесса, включающих в себя плотность тока  $j$  подаваемого к ролику в процессе обкатки покрытия и расход порошка  $Q_{II}$ , была выполнена серия компьютерных экспериментов с целью установления взаимосвязи этих параметров с плотностью  $\rho$  получаемого покрытия, когезией  $\sigma_{коз}$  и шероховатостью  $R_q$  покрытия, а также с остаточными напряжениями  $\sigma_{ост}$ . Результаты показали, что наилучшие показатели покрытия достигаются при расходе порошка  $Q_{II}$  в диапазоне от 3,6 до 4,7 мг/с, и плотности тока, пропускаемого через ролик  $j$  от 90 до 200 А/мм<sup>2</sup>.

Далее, на опытных образцах в лабораторных условиях были получены отдельные уравнения регрессии влияния основных факторов плазменного напыления и электрохимической обработки на относительную износостойкость  $Y_1$  и  $Y_2$ , соответственно (10) и (11):

$$Y_1 = -23,33 + 1,006 \cdot j + 0,8567 \cdot Q_{заза} + 0,0104 \cdot Q_{II} - 0,0107 \cdot j^2 - 0,21 \cdot Q_{заза}^2 \quad (10)$$

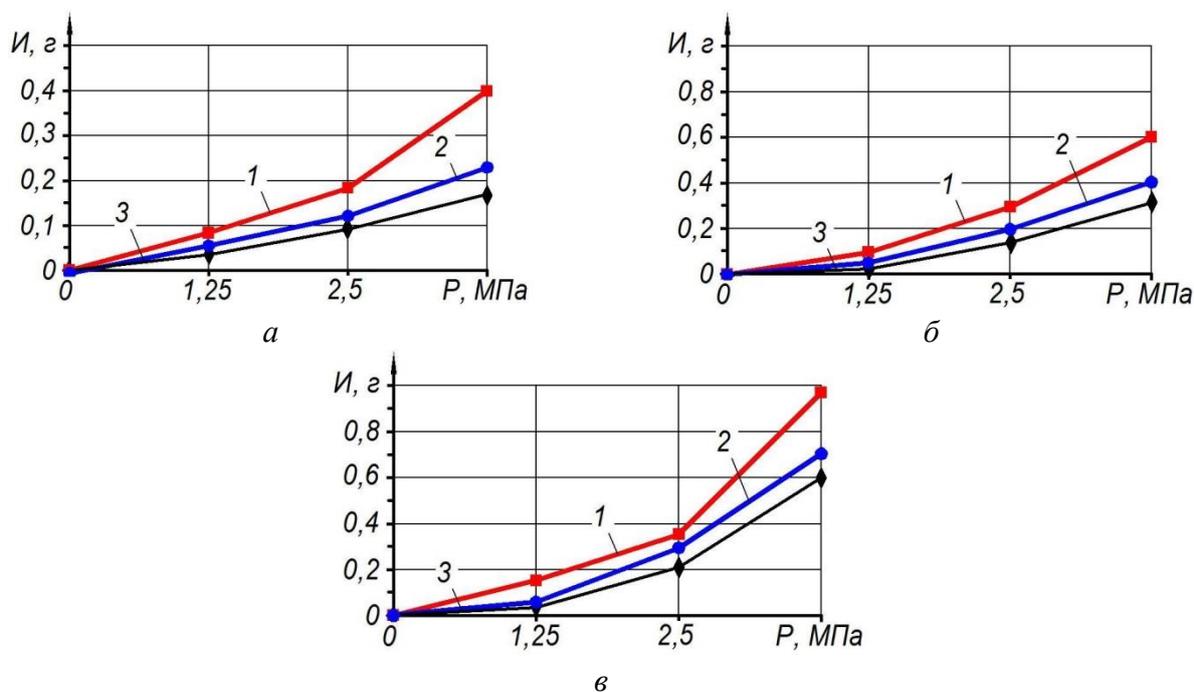
$$Y_2 = 0,8029 - 0,003 \cdot j - 0,0015 \cdot P_p \quad (11)$$

Перед оптимизацией параметров предлагаемого технологического процесса, опытным путем в лабораторных условиях была определена критическая толщина наносимого и упрочняемого покрытия из материала ПГСР-4. Критическая толщина, при увеличении которой покрытие отслаивалось и растрескивалось, составило для исследуемого материала – 0,3 мм. С помощью

регрессионных уравнений были получены следующие оптимальные значения параметров процесса: давление  $P_p$  ролика в зоне контакта с покрытием – 50 МПа, расход  $Q_{II}$  подаваемого порошка 30 г/ч, сила тока  $j$  дуги в процессе плазменного напыления – 50 А, расход  $Q_{газа}$  плазмообразующего газа (аргона) – 2,5 л/мин, сила тока  $j$  при электромеханической обработке – 850 А, напряжение  $U$  при электромеханической обработке – 1,5.

Сравнение физико-механических и триботехнических характеристик показало улучшение свойств покрытий, полученных по предлагаемой технологии в сравнении с технологией плазменного напыления с последующей электромеханической обработкой. Металлография полученного по предлагаемой технологии покрытия в сравнении с традиционным плазменным покрытием показала изменение его поверхности, которые можно охарактеризовать наличием более равномерной и сплошной переходной зоны между основным металлом и покрытием, а также появлением плавного сплошного перехода между основным металлом и покрытием.

Результаты испытания лабораторных образцов на износ в условиях абразивно-масляной среды приведены на рисунке 8. Общей тенденцией всех полученных зависимостей является увеличение износа исследуемых покрытий при повышении скоростей скольжения  $V$  и удельного давления  $P$ . Выявлено, что износостойкость покрытия полученного по предлагаемой технологии превышает износостойкость покрытий нанесенных по сравниваемым технологиям во всех исследуемых диапазонах удельного давления  $P$  и скоростей  $V$  вращения.



$a$  – при  $V = 0,78$  м/с;  $б$  – при  $V = 1,3$  м/с;  $в$  – при  $V = 2,6$  м/с;

1 – покрытие, нанесенное на лабораторный образец плазменным напылением;

2 – покрытие, нанесенное на лабораторный образец плазменным напылением и упрочненное электромеханической обработкой поэтапно; 3 – покрытие, нанесенное на лабораторный образец плазменным напылением и упрочненное электромеханической обработкой одновременно

Рисунок 8 – Влияние удельного давления  $P$  на износ  $I$  покрытия ПГСР-4 при различных значениях скорости  $V$  скольжения исследуемых образцов полученных по сравниваемым технологиям

#### 4 Обсуждение и заключение

На основании проведенных теоретического и экспериментального исследования можно заключить, что полученные в лабораторных условиях на опытных образцах оптимальные параметры технологического процесса одновременного нанесения и упрочнения покрытия целесообразно использовать для технологического процесса восстановления шеек коленчатого вала

двигателя лесовозного автопоезда. Для ускорения внедрения данной технологии в производство требуется решить следующие задачи:

– провести экспериментальные исследования по уточнению физико-механических свойств покрытий, нанесенных на коренные и шатунные шейки коленчатых валов двигателей лесовозных автопоездов по предлагаемой технологии одновременного нанесения покрытия плазменным напылением и упрочнения электромеханической обработкой;

– разработать и апробировать на основании уточненных в процессе экспериментального исследования оптимальных параметров процесса технологию восстановления шеек коленчатых валов двигателей лесовозных автопоездов;

– выполнить эксплуатационные и производственные испытания коленчатых валов двигателей лесовозных автопоездов, восстановленных по разработанной технологии;

– разработать рекомендации по использованию предложенного комбинированного способа для восстановления других ответственных деталей лесовозных автопоездов, а также строительной и дорожной техники.

### Список литературы

1 Будалин, С. В. Оценка эффективности лесовозных автопоездов на этапах выбора и эксплуатации / С. В. Будалин // учеб. пособие. – Екатеринбург : Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2014. – 215 с. *Библиогр.* : с. 168-177 (129 назв.).

2 Никонов, В. О. Современное состояние, проблемы и пути повышения эффективности лесовозного автомобильного транспорта / В. О. Никонов ; М-во образования и науки РФ, ФГБОУ ВО «ВГЛТУ». – Воронеж, 2021. – 202 с. – *Библиогр.* : с. 181-202 (196 назв.).

3 Карпов, А. С. Повышение эксплуатационных характеристик двигателей лесовозных автомобилей / А. С. Карпов // диссертация ... кандидата технических наук : 05.21.01, 05.22.10. – Воронеж, 2000. – 168 с. – *Библиогр.* : с. 112-124 (152 назв.).

4 Никонов, В. О. Совершенствование технологии восстановления шеек коленчатых валов автомобильных двигателей плазменным напылением с одновременной электромеханической обработкой / В. О. Никонов // диссертация ... кандидат технических наук : 05.22.10 [Место защиты : Владимир. гос. ун-т]. – Воронеж, 2013. – 187 с. – *Библиогр.* : с. 136-154 (165 назв.).

5 Кадырметов, А. М. Теоретические основы и технологическое обеспечение качества плазменного нанесения и упрочнения покрытий модуляцией электрических параметров : диссертация ... доктора технических наук : 05.02.07, 05.02.08 / А. М. Кадырметов ; [Место защиты : Воронеж. гос. техн. ун-т]. – Воронеж, 2013. – 383 с. – *Библиогр.* : с. 337-361 (218 назв.).

6 Яковлев, К. А. Разработка процесса термомеханического упрочнения поверхностей с газотермическими покрытиями : диссертация ... кандидата технических наук : 05.03.01. – Воронеж, 1998. – 201 с. – *Библиогр.* : с. 149-154 (69 назв.).

7 Бухтояров, В. Н. Технология восстановления цилиндрических поверхностей валов плазменным напылением с одновременным оплавлением выносной модулируемой дугой : На примере коленчатого вала : диссертация ... кандидата технических наук : 05.03.01. – Воронеж, 2003. – 165 с. – *Библиогр.* : с. 140-149 (94 назв.).

8 Alfares, M.A. Failure Analysis of a Vehicle Engine Crankshaft / M.A. Alfares, A.H. Falah, A.H. Elkholy // J Fail Anal. and Preven. (2007) 7 : 12-17. – *Bibliogr.*: pp. 17 (12 titles). – DOI 10.1007/s11668-006-9006-0.

9 Chenmin Zhao, Guofu Lian, Yang Zhang and Haiyan Hua The Forming Control Method of Double-Layer and Multi-Track Stacking Laser Cladding Applied on Crankshafts Restoration. JOM, Vol. 73, № 12, 2021. – pp. 4289-4298. – *Bibliogr.*: pp. 4297-4298 (25 titles). – DOI 10.1007/s11837-021-04852-2.

10 A. A. Öztürk, B. Gülenç, A. Durgutlu, and N. Kahraman Wear Behaviour of Crankshaft Journals Filled by Submerged Arc Welding. Metallofiz. Noveishie Tekhnol. 2014, 36, № 3, pp. 317-327. – *Bibliogr.*: pp. 327 (19 titles).

11 H. Huange et. al., Metal Magnetic Memory Technique and Its Applications in Remanufacturing, Science Press, 2021 12 p. – *Bibliogr.*: pp. 12 (6 titles). – DOI 10.1007/978-981-16-1590-0\_13.

12 N. M. Al-Araji, A. R. I. Kheder, A. M. Abu-Romman Rehabilitation of Automobile Crankshafts by Submerged-Arc Welding. Conference: The 1st Jordanian International Conference of Materials Science and Engineering At: Jordan, 2005. – 17 p. – *Bibliogr.*: pp. 8-9 (21 titles).

13 Yasutoshi Tominaga, Jinsoo Kim, Youngsik Pyun, Ravil Kayumov, Junhyong Kim and Juha Wool A study on the restoration method of friction, wear and fatigue performance of remanufactured crankshaft. Journal of Mechanical Science and Technology 27 (10) (2013) 3047-3051. – *Bibliogr.*: pp. 3051 (10 titles). – DOI 10.1007/s12206-013-0824-1.

14 Zhang Gue-qing, Wang Cheng-tao, PU Geng-qiang Fatigue life prediction of crankshaft repaired by twin arc spraying. Journal CSUT Vol. 12 Suppl., 2 2005. – pp. 70-76. – *Bibliogr.*: pp. 76 (15 titles).

15 George Mahu Evaluation of the Corrosion Resistance of Some Coating Obtained by Thermal Spray in Plasma Jet, on the Surface of Some Crankshafts Made of C45 Steel / George Mahu, Corneliu Munteanu, Bogdan Istrate, Igor Blanari, Cornelia Paleu, Cosmin Mihai Cotrut // Rev. Chim., 71 (10), 2020, 211-223. – *Bibliogr.*: pp. 222-223 (32 titles). – DOI 10.37358/RC.20.10.8366.

16 V. V. Le, D. N. Nguyen, A. X. Nguyen, T. T. V Tran, V. B. Nguyen (2019). Design A Technical Process Of Thermal Spray Applied To The Crankshaft Rehabilitation Of Ship. Journal of Mechanical Engineering Research & Developments, 42(1): 56-60. – *Bibliogr.*: pp. 59-60 (22 titles). – DOI 10.26480/jmerd.01.2019.56.60.

17 A. R. Yusufov, I. M. Abacharaev, and N. K. Sanaev Prospects for Protective Coating of Machine Parts. Russian Engineering Research, 2010, Vol. 30, №. 4, pp. 352-354. – *Bibliogr.*: pp. 354 (9 titles).

18 Пат. 2480533 РФ, МПК С23С4/18, В24В39/06, В23Н9/00. Способ комбинированного упрочнения поверхностей деталей / 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 ; опубл. 27.04.2013, Бюл. № 12. – 8 с.

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

20 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа для моделирования способа комбинированного упрочнения поверхностей деталей / 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.

21 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа для исследования эффективности способа комбинированного упрочнения плазменных покрытий / 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.

## References

1 Budalin, S. V. *Oценка эффективности лесовозных автопоездов на этапах выбора и эксплуатации* [Evaluation of the efficiency of timber road trains at the stages of selection and operation]. textbook. allowance. – Yekaterinburg : Ural. state forest engineering un-t, 2014. – 215 p. (In Russ.).

2 Nikonov V. O. *Sovremennoe sostoyanie, problemi i puti povisheniya effektivnosti lesovoznogo avtomobilnogo transporta* [Current state, problems and ways to improve the efficiency of timber road transport]. Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Federal State Budgetary Edu-

ational Institution of Higher Education "VGLTU". – Voronezh, 2021. – 202 p. (In Russ.).

3 Karpov, A. S. *Povyshenie ekspluatatsionnykh harakteristik dvigatelej lesovoznykh avtomobilej* [Improving the performance of engines of timber trucks]. dissertation ... candidate of technical sciences: 05.21.01, 05.22.10. – Voronezh, 2000. – 168 p. (In Russ.).

4 Nikonov, V. O. *Sovershenstvovanie tekhnologii vosstanovleniya sheek kolenchatykh valov avtomobil'nykh dvigatelej plazmennym napyleniem s odnovremennoy elektromekhanicheskoy obrabotkoj* [Improving the technology of restoring the crankshaft journals of automobile engines by plasma spraying with simultaneous electromechanical processing]. dissertation ... candidate of technical sciences : 05.22.10 [Place of protection: Vladimir. state university]. – Voronezh, 2013. – 187 p. (In Russ.).

5 Kadyrmetov, A. M. *Teoreticheskie osnovy i tekhnologicheskoe obespechenie kachestva plazmennogo naneseniya i uprochneniya pokrytij modulyaciej elektricheskikh parametrov* [Theoretical foundations and technological support for the quality of plasma deposition and hardening of coatings by modulation of electrical parameters]. dissertation ... Doctor of Technical Sciences : 05.02.07, 05.02.08 / A. M. Kadyrmetov ; [Place of protection: Voronezh. state tech. university]. – Voronezh, 2013. – 383 p. (In Russ.).

6 YAKovlev, K. A. *Razrabotka processa termomekhanicheskogo uprochneniya poverhnostej s gazotermicheskimi pokrytiami* [Development of the process of thermomechanical hardening of surfaces with gas-thermal coatings]. dissertation ... Cand.Tech.Sci. : 05.03.01. – Voronezh, 1998. – 201 p. (In Russ.).

7 Buhtoyarov, V. N. *Tekhnologiya vosstanovleniya cilindricheskikh poverhnostej valov plazmennym napyleniem s odnovremennym oplavleniem vynosnoj moduliruemoj dugoj : Na primere kolchatogo vala* [Technology of restoring cylindrical surfaces of shafts by plasma spraying with simultaneous flashing by an external modulated arc : On the example of a crankshaft]. Dissertation ... Cand. Tech. Sci. : 05.03.01. – Voronezh, 2003. – 165 p. (In Russ.).

8 Alfares, M.A. Failure Analysis of a Vehicle Engine Crankshaft / M.A. Alfares, A.H. Falah, A.H. Elkholy // J Fail Anal. and Preven. (2007) 7 : 12-17: doi : 10.1007/s11668-006-9006-0.

9 Chenmin Zhao, Guofu Lian, Yang Zhang and Haiyan Hua The Forming Control Method of Double-Layer and Multi-Track Stacking Laser Cladding Applied on Crankshafts Restoration. JOM, Vol. 73, №. 12, 2021. – pp. 4289-4298 : doi : 10.1007/s11837-021-04852-2.

10 A. A. Öztürk, B. Gülenç, A. Durgutlu, and N. Kahraman Wear Behaviour of Crankshaft Journals Filled by Submerged Arc Welding. Metallofiz. Noveishie Tekhnol. 2014, 36, № 3, pp. 317-327. – *Bibliogr.*: pp. 327 (19 titles).

11 H. Huange et. al., Metal Magnetic Memory Technique and Its Applications in Remanufacturing, Science Press, 2021 12 p. : doi : 10.1007/978-981-16-1590-0\_13.

12 N. M. Al-Araji, A. R. I. Kheder, A. M. Abu-Romman Rehabilitation of Automobile Crankshafts by Submerged-Arc Welding. Conference: The 1st Jordanian International Conference of Materials Science and Engineering At: Jordan, 2005. – 17 p.

13 Yasutoshi Tominaga, Jinsoo Kim, Youngsik Pyun, Ravil Kayumov, Junhyong Kim and Juha Wool A study on the restoration method of friction, wear and fatigue performance of remanufactured crankshaft. Journal of Mechanical Science and Technology 27 (10) (2013) 3047-3051 : doi : 10.1007/s12206-013-0824-1.

14 Zhang Gue-qing, Wang Cheng-tao, PU Geng-qiang Fatigue life prediction of crankshaft repaired by twin arc spraying. Journal CSUT Vol. 12 Suppl., 2 2005. – pp. 70-76.

15 George Mahu Evaluation of the Corrosion Resistance of Some Coating Obtained by Thermal Spray in Plasma Jet, on the Surface of Some Crankshafts Made of C45 Steel / George Mahu, Corneliu Munteanu, Bogdan Istrate, Igor Blanari, Cornelia Paleu, Cosmin Mihai Cotrut // Rev. Chim., 71 (10), 2020, 211-223 : doi : 10.37358/RC.20.10.8366.

16 V. V. Le, D. N. Nguyen, A. X. Nguyen, T. T. V Tran, V. B. Nguyen (2019). Design A Technical Process Of Thermal Spray Applied To The Crankshaft Rehabilitation Of Ship. Journal of Mechanical Engineering Research & Developments, 42(1): 56-60: doi : 10.26480/jmerd.01.2019.56.60.

17 A. R. Yusufov, I. M. Abacharaev, and N. K. Sanaev Prospects for Protective Coating of

Machine Parts. Russian Engineering Research, 2010, Vol. 30, №. 4, pp. 352-354.

18 Pat. 2480533 RF, IPC S23S4 / 18, V24V39 / 06, V23N9 / 00. The method of combined hardening of surfaces of parts / A. M. Kadyrmetov, G. A. Sukhochev, V. I. Posmetiev, V. O. Nikonov, V. V. Posmetiev, A. F. Maltsev; applicant and patent holder Limited Liability Company "Accessible Robotics" – 2011140996 / 02; dec. 10.11.2011 ; publ. 27.04.2013, Bull. №. 12. – 8 p. (In Russ.).

19 Utility model patent 129021 RF, IPC V05V13 / 04. Posmetiev, V. I., Kadyrmetov, A. M., Nikonov, V. O., and Pustovalov, A. S. applicant and patent holder FGBOU VPO VGLTA. – №. 2012156454 / 05 ; dec. 12.26.2012 ; publ. 06.20.2013 ; Bull. №. 17. (In Russ.).

20 Certificate of state registration of the computer program. Program for modeling the method of combined hardening of surfaces of parts / V. O. Nikonov, A. M. Kadyrmetov, V. I. Posmetiev, V. V. Posmetiev ; Copyright holder FGBOU VPO VGLTA. 2013612101 ; dec. 12.21.2012 ; registered in the Register of Computer Programs on February 14, 2013. (In Russ.).

21 Certificate of state registration of the computer program. Program for the study of the effectiveness of the method of combined hardening of plasma coatings / A. M. Kadyrmetov, V. O. Nikonov, V. I. Posmetiev, V. V. Posmetiev; Copyright holder FGBOU VPO VGLTA. – №. 2013615055 ; dec. 04.17.2013 ; registered in the Register of Computer Programs on May 27, 2013. (In Russ.).

© Посметьев В.И., Кадырметов А.М., Никонов В.О., 2021