

DOI: 10.34220/2311-8873-2022-24-31



УДК 621.793.71

2.5.5 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки

ПОВЕРХНОСТНОЕ УПРОЧНЕНИЕ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ НАГРУЖЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ТЕРМО- И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ

✉¹**Попов Дмитрий Анатольевич**
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры машиностроительных технологий ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, РФ
e-mail: qaz.7@mail.ru

Сухочев Геннадий Алексеевич
доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения Воронежского государственного технического университета (РФ)

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

Снятков Евгений Вячеславович
кандидат технических наук, доцент кафедры производства, ремонта и эксплуатации машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, РФ

Балахнова Юлия Владимировна
магистрант 3 курса автомобильного факультета, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, РФ

SUPERFICIAL HARDENING OF PROTECTIVE COATINGS OF LOADED PARTS OF THERMO- AND ELECTROMECHANICAL TREATMENT

✉¹**Popov Dmitrii Anatolevich**
candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the department of mechanical engineering technologies, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, RF
e-mail: qaz.7@mail.ru

Suchochev Gennadii Alekseevich
doctor of technical sciences, professor at the engineering technology chair of the Voronezh State Technical University, Russian Federation

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

Snyatkov Evgenii Vyacheslavovich
candidate of technical sciences, 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

Balahnova Yuliya Vladimirovna
3rd year undergraduate of the Faculty of Automobiles, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, RF

Аннотация.

Работа посвящена вопросам поверхностного упрочнения нанесённых покрытий термо- и электромеханическим упрочнением, а также виброабразивным шлифованием и струйно-динамическим способом. Проведен анализ влияния упрочняющей обработки на эксплуатационные свойства покрытий; предложены результаты экспериментальных исследований с указанием методики эксперимента и использованных оборудования и приборов.

Ключевые слова: ПЛАЗМЕННОЕ НАПЫЛЕНИЕ, СПОСОБЫ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ, КАЧЕСТВО ПОКРЫТИЯ

Annotation.

The work is devoted to the surface hardening of the covered with thermo and electromechanical hardening, as well as vibro-abrasive grinding and jet-dynamic method. An analysis of the impact of strengthening processing on the operational properties of coatings was carried out; The results of experimental studies are presented indicating the methodology of experiment and used equipment and devices.

Keywords: PLASMA SPRAYING, METHODS OF THERMOMECHANICAL HARDENING, COATING QUALITY

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

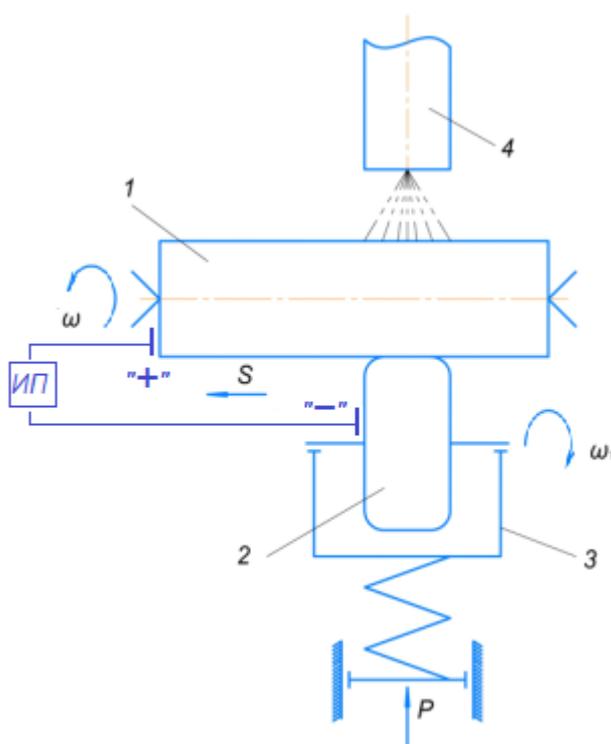
Эксплуатационные параметры изделия определяются в основном характеристиками поверхностного слоя и загруженности деталей. Поэтому экономически оправдывает себя применение специальных покрытий, обеспечивающих нужный комплекс свойств поверхности.

Одним их эффективных прогрессивных технологических процессов нанесения покрытий является плазменное напыление. Однако применение таких покрытий в высоконагруженных узлах трения ограничено существующим уровнем прочностных свойств, достигаемых при напылении. Это обусловлено двумя причинами: во-первых, возникающие в процессе эксплуатации при контактом трении сдвиговые и растягивающие напряжения приходятся непосредственно на слои покрытия; во-вторых, структурная неоднородность покрытий и внутренние отрицательные напряжения в них приводят к недостаточной прочности покрытий (когезионной и адгезионной) и пористости. Сочетание указанных высоких эксплуатационных нагрузок с недостаточными прочностными характеристиками не обеспечивает необходимой надежности покрытий. Указанных недостатков можно частично избежать при дорогостоящих вакуумных методах получения покрытий, в частности, ионной бомбардировкой в вакууме, и которые также необходимо подвергать отделочно-упрочняющей обработке для повышения сопротивляемости износу различного рода [1, 2]. Однако более технически и экономически более эффективен подход упрочнения в открытой атмосфере термо- и электромеханическими методами [3-10]. Что касается ионно-плазменных вакуумных покрытий, то проведенные исследования показали, что получение положительного эффекта возможно при использовании как виброабразивного шлифования, так и струйно-динамического способа упрочнения микрошариками [11]. Термо- и электромеханическое упрочнение покрытий позволяет значительно снизить трудоемкость последующей механической обработки нанесенного слоя или вообще её исключить, т.е. назначить её в качестве финишной операции. Известно, что применительно к поверхностям сложной формы наибольший эффект позволяют получить методы виброударного абразивного шлифования газотермических теплозащитных покрытий в специальных устройствах [10].

2 Материалы и методы

Исследования ТМО покрытий осуществлялось по схеме, представленной на рисунке 1, с помощью приспособления, представленного на рисунке 2, которое устанавливалось на суппорте токарного станка.

На экспериментальной плазменной установке [14] термомеханическому упрочнению подвергали покрытия ПГ-СР4 на основе никеля и хрома с флюсующими добавками дисперсностью 50-80 мкм. Упрочнение покрытий при их кратном оплавлении в общем цикле обработки достигалось за счет изменения микроструктуры и фазового состава сплава, а именно: периодическое оплавление вызывало расплавление и переплавление фазовых составляющих, сопровождающееся измельчением блоков кристаллической решетки и формированием закалочных структур. Технологический процесс формирования покрытий осуществлялся с помощью экспериментальной установки. Установка включала в себя помимо источника питания, плазмотрона и балластного сопротивления еще реле времени для регулирования нагрева покрытия образца путём периодического нагрева с регулируемой продолжительностью. Вследствие инерционности процесса нагрев образца снижался до прекращения через 7-10 секунд. Этого времени было достаточно для оплавления покрытия при общем нагреве образцов не более 270 °С.



1 – деталь; 2 – ролик для механической обкатки; 3 – фиксирующая державка; 4 – плазмотрон; P – усилие прижатия ролика к детали при обкатке; S – подача суппорта; ω – угловая скорость вращения шпинделя с деталью; ω_1 – угловая скорость вращения ролика; ИП – источник питания электромеханической обработки

Рисунок 1 – Схема процесса термо- и электромеханического упрочнения покрытий

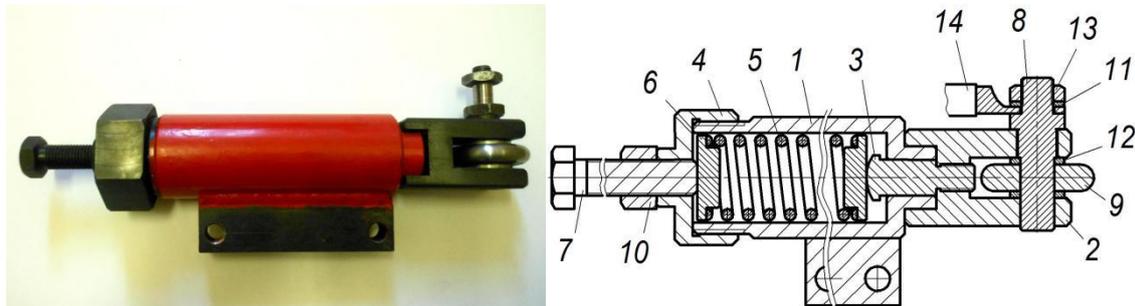
3 Результаты исследований

Ионно-плазменные покрытия.

На заданных режимах были упрочнены термомеханической обработкой три партии круглых образцов, предназначенных для последующих усталостных испытаний (табл. 1). Термомеханическая обработка образцов корректировалась для снижения остаточных напряжений растяжения струйно-динамической обработкой со сниженным давлением сжатого воздуха с 0,35 МПа до 0,2 МПа, а при вибрационной обработке – за счёт снижения амплитуды колебания с 4-5 мм до 2,5 мм. Определение предела выносливости σ_1 проводилось на образцах, изготовленных из материалов упрочняемых деталей. Работа проведена с использованием прибора МЭИС-1 косвенным методом, при котором величина предела выносливости связывается с характеристиками механических свойств металла или покрытия (по ширине риски от алмазного наконечника). Результаты испытания представлены в таблице 2.

Результаты испытания неупрочненных образцов на усталость перед нанесением на них ионно-плазменных покрытий показали снижение предела выносливости после нанесения на них покрытий толщиной 40-60 мкм. Упрочнение образцов перед нанесением ионно-

пламенных покрытий показывают повышение предела выносливости σ_{-1} на 15-20 % и его сохранение после нанесения покрытия. Усиление сопротивления усталости образцов может быть обеспечено упрочнением нанесенного покрытия на сниженных режимных значениях (на «мягких» режимах).



1 – корпус; 2 – вилка; 3 – толкатель; 4 – крышка; 5 – пружина; 6 – тарелка;
7 – болт; 8 – валик; 9 – ролик; 10 – гайка; 11 и 12 – шайба; 13 – гайка; 14 – клемма

Рисунок 2 – Приспособление для электромеханической обработки образцов с плазменными покрытиями

Таблица 1 – Результаты испытаний способов обработки с термомеханическим упрочнением

№ партии	Способ подготовки поверхностей	Способ обработки образца
1	Шлифование	(исходные)
2	–“–	Покрытие
3	–“–	Поверхностное упрочнение
4	–“–	Упрочнение + покрытие
5	–“–	Упрочнение + покрытие + упрочнение «мягкое»

Таблица 2 – Результаты определения выносливости образцов

№ партии	Обработка поверхности	Ширина рисок, мкм	Относит. предел выносливости, %
1	Исходная без упрочнения	137	100
2	Исходная + покрытие	157,5	55
3	Исходная + упрочнение	125	120
4	Исходная + упрочнения + покрытие	137	100
5	Исходная + упрочнение + покрытие + упрочнение	133	106

Испытания прочности соединения покрытий с основой предварительно упрочнённых и неупрочненных образцов, определённой методом отрыва склеенных образцов по стандартной методике, показали отсутствие отслоений покрытий при разрушении клеевого слоя, имеющего прочность на разрыв более 75-80 кгс/см². Это подтверждает обеспечение сохранение физико-механических свойств после нанесения на них покрытий [12, 13].

Воздушно-плазменные покрытия.

Основной целью проведенных исследований являлось определение закономерностей процесса термомеханической обработки обкаткой роликовым инструментом воздушно-плазменных покрытий в процессе их оплавления и экспериментальная оценка влияния упрочняющей обработки на сопротивление усталости упрочненных покрытий и их стойкость

изнашиванию, в том числе, в условиях абразивного трения.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи: разработать экспериментальное устройство для упрочняющей обработки воздушно-пламенных покрытий обкаткой роликовым инструментом, позволяющее изменять технологические параметры в широком диапазоне; экспериментально исследовать процесс упрочнения газотермических покрытий термомеханической обработкой (ТМО) роликовым инструментом; получить оптимальные режимы ТМО.

Известно, что качество покрытий после ТМО в наибольшей степени зависит от удельного давления на покрытие при обкатке, дистанции нагрева, мощности дуги и времени воздействия нагрева [1-5]. Эти технологические параметры были приняты в качестве входных факторов. Выходным параметром оптимизируемого процесса служили пористость, прочность соединения покрытия на сдвиг, сопротивление усталости и износостойкость.

Оптимизация технологических режимов методом Гаусса-Зайделя позволила найти следующие технологические режимы обработки: $P = 0,41$ ГПа; $L = 30$ мм; $N = 35$ кВт; $t = 18$ с. При данных режимах значение среднее значение пористости составило 1,3 %.

Оценка сопротивления усталости образцов с напыленным покрытием в условиях циклических знакопеременных нагрузок при вращении с изгибающим моментом, а также износостойкости при трении скольжения позволяет прогнозировать долговечность деталей и узлов трения в реальных условиях эксплуатации.

Анализ результатов сравнительных триботехнических испытаний, проведенных на лабораторной машине трения СМЦ-2, где в качестве лабораторных образцов (роликов) применяли упрочненные икратно оплавленные воздушно-плазменные покрытия, показали наличие усталостных трещин как в зоне между покрытием и основой, так и в покрытии с выходом на поверхность.

Поверхности покрытий, прошедшие обкатку, имели большую длительность периода, предшествовавшего началу возникновения усталостных трещин в переходной зоне между покрытием и основой, а также показали повышенное количество циклов до возникновения трещин в поверхностном слое. Это подтверждается тем, что ТМО никель-хромового с добавками бора и кремния покрытия ПГ-СР4 повышает число циклов до разрушения на 30-35 % с 9000 до 12000. Объяснением этого может служить перевод растягивающих остаточных внутренних напряжений в покрытии в остаточные сжимающие напряжения, а также ликвидация пор и возможных микротрещин, что приводит к росту сопротивления усталости покрытий в 1,2-1,3 раза.

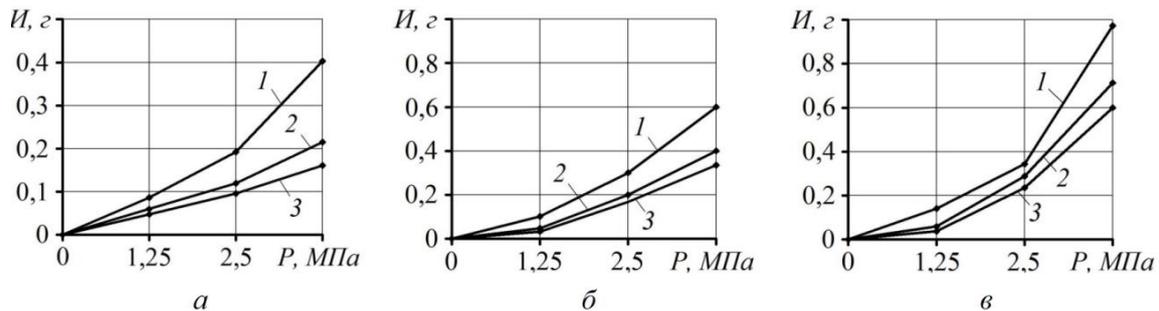
Испытания на изнашивание пар трения скольжения «ролик – колодка» с покрытием ролика материалом ПГ-СР4 и колодки из закаленной до 58 HRC стали 45 осуществлялись на машине трения вращения образцов СМЦ-2. Результаты исследований износостойкости образцов при скорости трения 0,78 м/с и давлении в зоне трения 1,25 МПа показали, что ТМО повышает износостойкость образцов-эталонов из закаленной до 58 HRC стали 45 в среднем в 2,8 раза. В сравнении с оплавленным покрытием износостойкость возрастает в 1,08 раз. С увеличением давления в зоне трения и скорости скольжения относительная износостойкость покрытий, упрочненных ТМО, возрастала.

Упрочнение покрытий электромеханической обработкой в сравнении с термомеханической обработкой позволяет дополнительно повысить прочностные свойства и износостойкость покрытий, что может быть объяснено усилением теплоподвода к покрытию и переходной зоне покрытия с основой при меньшем интегральном теплоподводе к образцу (табл. 3, рис. 3).

Характер износа поверхности образцов с нанесенным покрытием без упрочнения в условиях безабразивного трения имел усталостную природу, проявлявшуюся в мелких царапинах и чешуйчатом отслаивании изношенного металла с рабочей поверхности со следами адгезионного взаимодействия. Для упрочненных образцов адгезионного взаимодействия поверхностей при изнашивании не наблюдалось.

Таблица 3 – Свойства упрочненных и неупрочненных покрытий ПГ-СР4

Покрытие	σ , МПа	Микротвердость $H_{\mu sp}$, МПа	Пористость покрытия, %	Предел выносливости образца типа II по ГОСТ 25.502-79, МПа
неупрочненное	~70	12200 ± 2040	~1,7	200
упрочненное ТМО	~210	17200 ± 3150	~0,8	230
упрочненное ЭМО	~230	17500 ± 3000	~0,3	240



$a - V = 0,78$ м/с; $b - V = 1,3$ м/с; $v - V = 2,6$ м/с;

1 – воздушно-плазменное напыление (ВПН); 2 – ВПН с ТМО; 3 – ВПН с ЭМО

Рисунок 3 – Зависимости износа I покрытия ПГСР-4 от удельного давления P при пути трения 3 км в условиях трения скольжения в абразивно-масляной прослойке для различных скоростей скольжения

4 Обсуждение и заключение

Результаты исследований и наблюдений показали, что механические свойства плазменных покрытий, полученных в результате механической обкатки их роликом в процессе ТМО и ЭМО, существенно улучшались, в том числе для покрытий, нанесенных воздушно-плазменным напылением: прочность соединения на сдвиг возрастала более чем в 3 раза, пористость снижалась в 2 ... 5 раз. В сравнении с неупрочненными покрытиями интенсивность износа образцов, упрочненных ЭМО возрастает на 40 ... 80 %.

Возможным объяснением причин относительного улучшения механических свойств покрытий может служить оптимизация структуры покрытия и его упруго-напряженного состояния в результате создания напряжений сжатия при термо- и электромеханической обработке. На основании данных исследований можно заключить, что применение термо- и электромеханической обработки при плазменном нанесении покрытий позволяет существенно повысить сопротивление эксплуатационным воздействиям рабочих поверхностей деталей, эксплуатирующихся при циклических контактных нагрузках в условиях сухого, граничного и абразивного трения.

Список литературы

- 1 Барвинок, В. А. Управление напряженным состоянием и свойства плазменных покрытий. – М. : Машиностроение, 1990. – 384 с.
- 2 Барвинок, В. А. Расчет напряженно-деформированного состояния в поверхностном слое деталей газотурбинного двигателя после термопластического упрочнения / В. А. Барвинок, М. А. Вишняков, С. А. Игнатьев // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2009. – № 2. – С. 25-28. – URL : <https://rucont.ru/efd/424779>.
- 3 Левин, Э. Л. Термомеханическое упрочнение деталей при восстановлении наплавов / Э. Л. Левин, И. С. Синяговский, Г. С. Трофимов. – М. : Колос, 1974 – 160 с.

4 Багмутов, В. П. Электромеханическая обработка : технологические и физические основы, свойства, реализация / В. П. Багмутов, С. Н. Паршев, Н. Г. Дудкина, И. Н. Захаров. – Новосибирск : Наука, 2003. – 318 с.

5 Посметьев, В. И. Управление качеством плазменных покрытий деталей машин на основе модуляции параметров плазмотрона и электромеханической обработки / В. И. Посметьев, А. М. Кадырметов, В. О. Никонов, А. Ф. Мальцев // Мир транспорта и технологических машин. – Орел : Госуниверситет – УНПК, 2011. – № 4(35). – С. 23-31.

6 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). – Режим доступа : <http://ej.kubagro.ru/2013/03/pdf/30.pdf>, 0,813 у. п. л.

7 Кадырметов, А. М. Моделирование качества покрытий, полученных плазменным напылением с одновременной электромеханической обработкой / А. М. Кадырметов, Г. А. Сухочев, А. Ф. Мальцев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2013. – № 8. – С. 39-43.

8 Кадырметов, А. И. Технологическое обеспечение восстановления типовых деталей двс плазменным нанесением и упрочнением покрытий / А. М. Кадырметов, Е. В. Снятков, В. Н. Бухтояров, К. А. Радыгин, А. К. Андрущенко, И. А. Кичатов – Воронежский научно-технический вестник. – 2020. – Т. 2. – № 2 (32). – С. 177-190.

9 Kadyrmetov, A. M. Dual-program impulse modulation of plasmatron power in processes of plasma spraying / A. M. Kadyrmetov, S. N. Sharifullin, V. N. Bukhtoyarov, E. V. Snyatkov, A. S. Pustovalov / IOP Conf. Series : Journal of Physics : Conf. Series 1328 (2019) 012038. – pp. 1-7. – IOP Publishing doi : 10.1088/1742-6596/1328/1/012038.

10 Станчев, Д. И. К вопросу упрочнения газотермических покрытий / Д. И. Станчев, А. М. Кадырметов, К. А. Яковлев. – Воронеж, 1995, – 9 с. Деп. в ВИНТИ 29.03.95, в № 866-В95.

11 Сухочев, Г. А. Виброшлифование теплозащитного покрытия поверхностей детали отрасли / Г. А. Сухочев, А. В. Левченко // Технология. Технология машиностроения : Науч.-тех. сб. – М. : Машиностроение, 1991. – Вып. 3. – С. 15-18.

12 Смоленцев, В. П. Формирование поверхностей контактной и комбинированной обработкой / В. П. Смоленцев, Г. А. Сухочев, А. В. Бондарь // Третья международная научно-техническая конференция по теме : «Влияние технологии на состояние поверхностного слоя – ПС 96». – Гжов, Польша, 1996. – С. 171-181.

13 Сухочев, Г. А. Управление качеством изделий, работающих в экстремальных условиях при нестационарных воздействиях. – М. : Машиностроение, 2004. – 287 с.

14 Кадырметов, А. М. Оборудование для плазменного нанесения и упрочнения покрытий с модуляцией электрических параметров / А. М. Кадырметов, Д. И. Станчев, Г. А. Сухочев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2010. – № 11(71). – С. 41-48.

References

1 Barvinok, V. A. Management of a tense state and the properties of plasma coatings. – М. : Engineering, 1990. – 384 p.

2 Barvins, V. A. Calculation of a stress-deformed state in the surface layer of parts of the gas turbine engine after thermoplastic hardening / V. A. Barvinok, M. A. Vishnyakov, S. A. Ignatiev // Problems of Engineering and Automation. – 2009. – № 2.-S. 25-28. –URL : <https://rucont.ru/efd/424779>.

3 Levin, E. L. Thermomechanical strengthening of the details in the restoration of surfaces / E. L. Levin, I. S. Sinyagovsky, G. S. Trofimov – М. : Kolos, 1974 – 160 p.

4 Bagmutov, V. P. Electromechanical processing : technological and physical foundations, properties, implementation / V. P. Bagmutov, S. N. Parshev, N. G. Dudkin, I. N. Zakharov. –

Novosibirsk: Science, 2003 . – 318 p.

5 Posterity, V. I. Management of the quality of plasma coatings of cars of machines based on the modulation of plasmatoron parameters and electromechanical processing / V. I. Metev, A. M. Kadirmetov, V. O. Nikonov, A. F. Maltsev // World transport and technological machines. – Eagle : State University – UNPK, 2011. – № 4 (35). – S. 23-31.

6 Kadyrmetov, A. M. Assessment of the quality of plasma coatings applied by the combined method with the rolling of the roller, obtained on the basis of computer modeling / A. M. Kadirmetov, V. I. Imetyev, V. O. Nikonov, V. V. Metev // Politematic Network Electronic Scientific Journal of the Kuban State Agrarian University (Scientific Journal of KubGAU) [Electronic resource]. – Krasnodar: Kubbau, 2013. – № 03 (87). – Access mode : <http://ej.kubagro.ru/2013/03/pdf/30.pdf>, 0.813. p. 1.

7 Kadyrmetov, A. M. Modeling the quality of coatings obtained by plasma spraying with simultaneous electromechanical processing / A. M. Kadirmetov, G. A. Sukhochev, A. F. Maltsev // Solid technologies and coating. – 2013. – № 8. – S. 39-43.

8 Kadyrmetov, A. I. Technological support for the restoration of standard parts of the ICE with plasma application and strengthening of coatings / A. M. Kadirmetov, E. V. Vysatkov, V. N. Bukhtoyarov, K. A. Radigin, A. K. Andryushchenko, I. A. Kichatov – Voronezh Scientific and Technical Bulletin. – 2020. – Т. 2. – № 2 (32). – S. 177-190.

9 Kadyrmetov, A. M. Dual-Program Impulse Modulation of PlaySmatron Power in Practsma SPRAYING / A. M. Kadyrmetov, S. N. Sharifullin, V. N. Bukhtoyarov, E. V. Snyatkov, A. Sal Series : Journal of Physics : Conf. Series 1328 (2019) 012038. – pr. 1-7. – IOP Publishing DOI : 10.1088/1742-6596/1328/1/012038.

10 Ranchev, D. I. On the issue of strengthening of gas -terminal coatings / D. I. Stanshev, A. M. Kadyrmov, K. A. Yakovlev. – Voronezh, 1995, – 9 p. Dep. In Viniti 03/29/95, in № 866-B95.

11 Suchachev, G. A. Vibration grinding of the heat-protective coating of the surfaces of the part of the industry / G. A. Sukhachev, A. V. Levchenko // Technology. Engineering Technology : Scientific and Technology. Sat. – М. : Mechanical Engineering, 1991. – Issue. 3. – S. 15-18.

12 Smolentsy, V. P. Formation of surfaces of contact and combined processing / V. P. Smolentsev, G. A. Sukhochev, A. V. Bondar // Third International Scientific and Technical Conference on the topic : "The influence of technology on the state of the surface layer-PS 96". – GZHOV, Poland, 1996. – S. 171-181.

13 Sukhochev, G. A. Management of the quality of products working in extreme conditions under non-stationary influences. – М. : Engineering, 2004. – 287 p.

14 Kadyrmetov, A. M. Equipment for plasma application and hardening of coatings with modulation of electrical parameters / A. M. Kadirmetov, D. I. Stanshev, G. A. Sukhochev // strengthening technologies and coating. – 2010. – № 11 (71). – S. 41-48.

© Попов Д.А., Сухочев Г.А., Никонов В.О., Снятков Е.В., Балахнова Ю.В., 2022