

УДК 621.793.74: 621.791.927.55

UDC 621.793.74: 621.791.927.55

**ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА  
ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ С  
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ  
ПОКРЫТИЙ**

**THE PECULIARITIES OF PLASMA SPRAYING  
PROCESS WITH ELECTROMECHANICAL  
TREATING OF PLASMA COATING**

Кадырметов Анвар Минирович  
к.т.н., доцент кафедры производства, ремонта и  
эксплуатации машин

Kadyrmetov Anwar Minirovich  
Cand.Tech.Sci., associate professor

Драпалюк Михаил Валентинович  
д.т.н., профессор кафедры механизации лесного  
хозяйства

Drapalyuk Mikhail Valentinovich  
Dr.Sci.Tech., professor

Никонов Вадим Олегович  
аспирант

Nikonov Vadim Olegovich  
postgraduate student

Мальцев Александр Федорович  
старший преподаватель кафедры производства,  
ремонта и эксплуатации машин  
*Воронежская государственная лесотехническая  
академия, Воронеж, Россия*

Maltsev Aleksandr Fedorovoch  
senior lecturer  
*Voronezh State Forestry Academy, Voronezh, Russia*

Представлены возможные пути управления каче-  
ством плазменных покрытий. Рассмотрен новый  
перспективный метод совершенствования плаз-  
менных покрытий путем совмещения плазменного  
напыления с одновременной электромеханической  
обработкой покрытия. Приведен анализ факторов  
комбинированного процесса. Представлены ре-  
зультаты компьютерного моделирования влияния  
факторов процесса на параметры качества покры-  
тий

Some possible ways to control the quality of plas-  
ma coating are presented. An advanced method of plas-  
ma coating perfection is observed. It is character-  
ized by combination of plasma spraying with simultane-  
ous electromechanical treating of coating. The analy-  
sis of combined process factors is given. Besides,  
there are computer modeling results of process fac-  
tors effects on coating quality parameters

Ключевые слова: ПЛАЗМЕННОЕ НАПЫЛЕНИЕ,  
УПРОЧНЕНИЕ, ПЛАЗМЕННОЕ ПОКРЫТИЕ,  
ПЛАЗМОТРОН, ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ  
ОБРАБОТКА, ДЕТАЛЬ

Keywords: PLASMA SPRAYING,  
STRENGTHENING, PLASMA COATING,  
PLASMA TORCH, ELECTROMECHANICAL  
TREATING, DETAIL

**Введение**

Плазменное напыление (ПН) относится к прогрессивным технологи-  
ям формирования покрытий различного функционального назначения, в  
том числе, износо- и коррозионностойких покрытий. Широкое использо-  
вание плазменного напыления сдерживается недостаточным качеством по-  
лучаемых покрытий для ряда деталей, испытывающих во время работы  
значительные ударные нагрузки (зубья шестерен, седла клапанных гнезд в  
головках и блоках цилиндров, кулачки распределительного вала и т. д.).

Устранение указанного недостатка реализуется как за счет самой операции напыления, так и последующей обработки покрытия или ее совмещения с напылением. Совмещение операций нанесения и упрочнения покрытий имеет преимущества перед другими методами и позволяет уменьшить время на обработку детали, подготовительно-заключительное время, сэкономить энергию, способствует увеличению производительности и эффективности получения качественных покрытий. При этом основные достоинства отдельно взятых составляющих процессов при этом остаются. Одним из наиболее перспективных является метод, совмещающий операции напыления и электромеханической обработки (ЭМО) покрытий [1]. Работа посвящена изучению данного комбинированного процесса путем компьютерного моделирования и получения данных по влиянию факторов на критерии процесса и по оптимизации процесса.

### **Состояние исследований и актуальность работы**

Упрочнение покрытий с помощью термо- и электромеханической обработки позволяет уменьшить припуск на финишные операции шлифования и полирования, залечить микротрещины, сэкономить дорогостоящие материалы покрытия и абразивного инструмента. За счет высоких скоростей нагрева и охлаждения покрытий при электромеханической обработке возможно формирование высокопрочной структуры сорбита. Известно, что упрочнение плазменных покрытий путем ЭМО наноструктурирует их и обеспечивает высокую износостойкость со свойствами на уровне монолитных материалов, уплотняет покрытия на 10-20 %, повышает микротвердость на 60-70 %, увеличивает адгезионную прочность до 3 раз [2, 3]. Однако использование данного метода ограничено диапазоном толщин покрытий порядка 0,2-0,5 мм, при превышении которых покрытие вследствие ламелеобразной структуры, наличия в нем высоких остаточных напряжений и хрупкости может растрескиваться и отслаиваться. Для покрытий

толщиной свыше 0,2-0,5 мм данный метод является трудоемким, нуждающимся в дополнительных затрат энергии, так как требует нескольких кратных повторений операций напыления и упрочнения.

Устранение указанного ограничения по критической толщине покрытия возможно за счет совмещения в одной технологической операции процессов плазменного напыления покрытия и одновременной электромеханической обработки. Данный способ реализуется плазменным напылением покрытия *1* на деталь *2* с помощью плазменной струи *3* плазмотрона *4* с одновременной электромеханической обработкой напыляемого покрытия *1* с помощью ролика *5*, обкатывающего покрытие с прижимным усилием *F* (рис. 1).

Поскольку процесс включает в себя использование двух мощных источников тепла, то для исключения перегрева основы с покрытием требуется система охлаждения, которая включает в себя охлаждающие струи *6* и *8* от форсунок *7* и *9*.

Данный способ является ресурсосберегающим, универсальным по толщине покрытий и обеспечивающим его высокую плотность, адгезионную и когезионную прочность. Способ может применяться для различной номенклатуры деталей, в том числе и автомобильных деталей и деталей, имеющих сложную конструктивную конфигурацию, для которых подбирается соответствующая технологическая оснастка.

Научной и технологической проблемой в данном сложном для изучения комбинированном процессе является определение влияния основ-

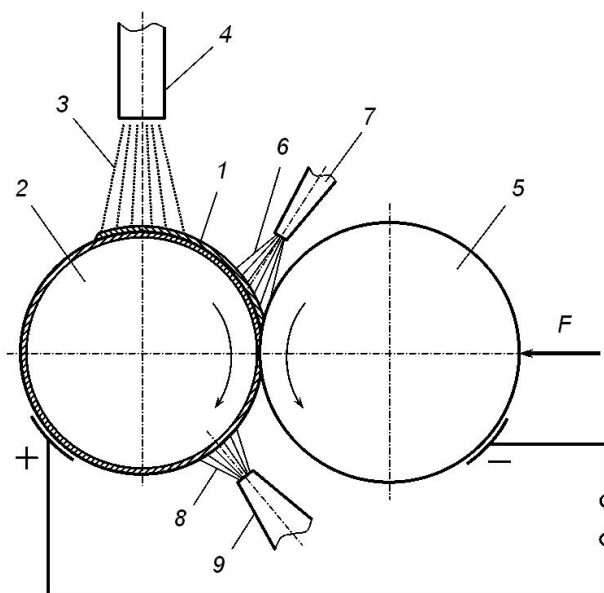


Рис. 1. Схема комбинированного нанесения покрытия: *1* – покрытие; *2* – деталь; *3* – плазменная струя; *4* – плазмотрон; *5* – ролик; *6*, *8* – охлаждающая струя; *7*, *9* – форсунки; *F* – сила прижима ролика

ных факторов на его критерии и оптимизация процесса. Это позволит решить практическую проблему достижения необходимого качества плазменных покрытий, обеспечивающих их использование при динамических, в том числе ударных, и знакопеременных нагрузках и лишенных указанных недостатков (перегрева подложки, отсутствия ее коробления и высоких остаточных напряжений).

Объектом исследования является комбинированный процесс плазменного нанесения с ЭМО покрытий, предметом исследования – зависимости критериев процесса и показателей качества покрытий от его факторов. Целью работы является определение методов управления качеством покрытий и оптимизация процесса. Задачи исследования включают определение основных факторов процесса и проведение компьютерного моделирования для определения влияния этих факторов на критерии процесса.

Решение проблемы повышения качества плазменных покрытий в рассматриваемом комбинированном процесс зависит от выбора из общей массы наиболее существенных, лимитирующих факторов, которые могут быть приняты в качестве основных управляющих технологических параметров процесса, и оптимизируемых критериев процесса.

### **Анализ основных факторов комбинированного процесса**

Поэтапная технологическая схема влияния факторов плазменного напыления на критерии процесса представлена в работах [4, 5]. В комбинированном процессе добавляются факторы ЭМО: мощность электрического тока, проходящего через систему «покрытие – основа», кинематические параметры взаимного перемещения ролика и основы, сила прижима ролика к основе, конструктивные параметры ролика.

Для предварительной оперативной оценки температур покрытия в процессе плазменного напыления с ЭМО разработана математическая модель на основе использования математического аппарата процессов при контактной

(шовной) сварке [6], модифицированная для системы «плазменное покрытие-основа». Модель включает в себя интегральные соотношения подвода и отвода тепла, изменения теплосодержания металла обрабатываемой переходной зоны «покрытие-основа», зависимости для определения составляющих электрических сопротивлений контактных зон, закон Джоуля-Ленца, известные зависимости распределения тепла от пятна плазменного напыления и зон охлаждения. Данная модель имеет множество допущений и упрощений, её применимость ограничена описанием только установившихся процессов для полуграниченного тела. Учет геометрических особенностей детали с покрытием и наличие импульсных процессов значительно усложняет модель. В этой связи целесообразен численный метод описания объекта путем его дискретизации на множество элементов и использования базовых фундаментальных физических и термодинамических уравнений. Для этого была разработана модель на основе метода дискретных элементов для механического состояния системы «покрытие – основа», близкого к SPH-методу (Smoothed Particles Hydrodynamics), и на основе метода конечных разностей для тепловой задачи [7]. Дискретные элементы моделируемой среды взаимодействуют между собой с силами, учитывающими упругие силы и силы вязкого трения, и движутся по законам классической механики, описываемыми ньютоновскими уравнениями движения. Тепловая задача основывается на базовых уравнениях классической термодинамики и использовании уравнений теплопроводности.

### **Результаты моделирования процессов**

Для удобства исследования математической модели и для проведения с её использованием компьютерных экспериментов была разработана компьютерная программа для ЭВМ на языке Object Pascal в интегрированной среде программирования Borland Delphi 7 [8]. Параметры компьютерной модели были близки к следующим реальным параметрам процесса нанесения покрытия: подложка – сталь; порошок ПН55Т45; диаметр частицы по-

рошка (элемента модели) 10 мкм; эффективный радиус ролика 10 мм; характерная толщина одного слоя покрытия 50 мкм; скорость перемещения плазмотрона и ролика относительно поверхности 1 см/с; расход порошка 10 мг/с; характерное давление ролика 100 МПа.

Механическое воздействие обкатывающего ролика приводит к перестройке структуры покрытия (рис. 2, а). В частности, поверхность покрытия после прохода ролика становится более ровной: пустоты поверхности заполняются за счет смещения выпуклостей. Кроме того, действие ролика приводит к тому, что взаимное расположение элементов покрытия становится более упорядоченным. Однако при недостаточно прогревом покрытия проявляются и отрицательные стороны механического воздействия: покрытие после прохода ролика имеет зёрненную структуру со значительным количеством небольших трещин. Распределение электрического потенциала в рабочей зоне ролика при условии, что поверхность детали имеет потенциал 0 В, а ролик – потенциал 6 В представлено на рисунке 2, б. Из рисунка 2 видно, что наибольший разогрев покрытия при электромеханической обработке производится как раз в том месте, где он и необходим – в месте основного ввода механических напряжений.

С помощью разработанной модели проведена серия компьютерных экспериментов, в которой изменяли расход порошка в диапазоне от 0,001 до 5 г/с. Расход порошка, при одинаковой скорости движения плазмотрона относительно неподвижной восстанавливаемой поверхности, определяет толщину слоя покрытия.

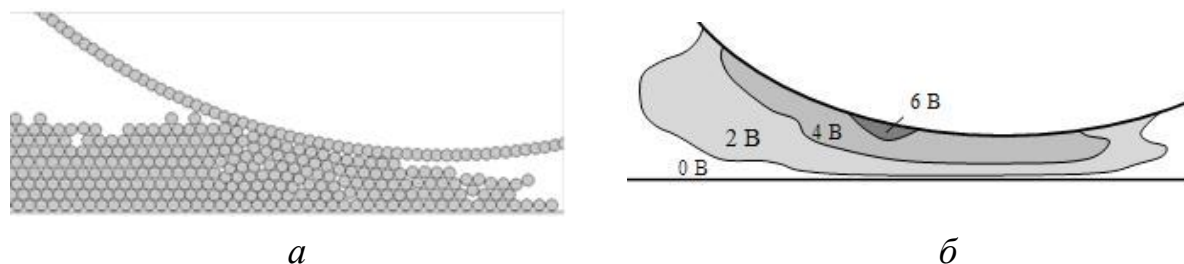


Рис. 2. Изменение структуры покрытия при проходе обкатывающим роликом второго слоя покрытия (а) и распределение электрического потенциала в покрытии вблизи зоны контакта ролика с покрытием (б)

Результаты расчетов показали, что при любой толщине слоя механическое действие ролика приводит к существенному снижению шероховатости поверхности. Плотность покрытия увеличивается с увеличением расхода порошка, так как при малом расходе покрытие имеет островковую структуру и с увеличением расхода сплошность покрытия увеличивается. Обкатка роликом покрытия позволяет увеличить его плотность ориентировочно на 5 % по сравнению с обычным плазменным напылением. Шероховатость поверхности покрытия снижается при обкатке на 40-70 %. Однако она незначительно, на 0,5 мкм, растет с увеличением  $Q_{\text{п}}$ , так как с увеличением толщины покрытия увеличивается амплитуда неровностей поверхности.

В результате обкатки роликом когезионная прочность покрытия с ростом расхода порошка снижается на ~ 20 МПа. Обкатка покрытия роликом без пропуска тока в сравнении со случаем без обкатки роликом приводит к падению когезионной прочности на 3-8 МПа. Данный отрицательный эффект выражен тем сильнее, чем больше толщина покрытия. Снижение когезионной прочности может служить косвенным подтверждением увеличения остаточных растягивающих напряжений в покрытии в направлении, перпендикулярном его поверхности. Аналогичный отрицательный эффект механического воздействия получен в отношении остаточных напряжений. Это имеет место во всем интервале расхода порошка  $Q_{\text{п}}$  несмотря на некоторое повышение силы когезии при  $Q_{\text{п}} \geq 3$  мг/с. Данные результаты показывают, что механическая обработка без пропуска тока через зону «покрытие – основа» позволяет улучшить плотность покрытия и снизить шероховатость, однако приводит к снижению когезии и росту внутренних напряжений. Электромеханическая обработка непосредственно после плазменного нанесения покрытия позволяет устранить отрицательный эффект механической обработки, заключающийся в создании дополнительных внутренних повреждений покрытия. При этом сохраняется положительный эффект механической обработки, заключающийся в увеличении плотности и снижении шероховатости.

Для исследования влияния силы прижатия обкатывающего ролика к поверхности детали проведена серия компьютерных экспериментов, в которой варьировали давление обкатки  $P_p$  на уровнях 0,1; 0,3; 1,0; 3,0; 10; 30; 100; 300; 1000 МПа (рис. 3). Анализируя графики, можно заметить, что плотность покрытия и когезионная прочность практически не зависят от давления обкатки (рис. 3, а, в). При увеличении давления обкатки  $P_p$  шероховатость поверхности сначала уменьшается ( $P_p$  менее 3 МПа), что связано с увеличивающейся способностью ролика распределять выступающие части покрытия между впадинами (рис. 3, б). При давлении же обкатки более 100 МПа происходит механическое разрушение покрытия, поэтому в данном диапазоне  $P_p$  наблюдается рост шероховатости. Наименьшая шероховатость поверхности наблюдается в довольно широком диапазоне  $P_p$  от 2 до 100 МПа. Остаточные напряжения  $\sigma_{ост}$  растут с увеличением  $P_p$  (рис. 3, г).

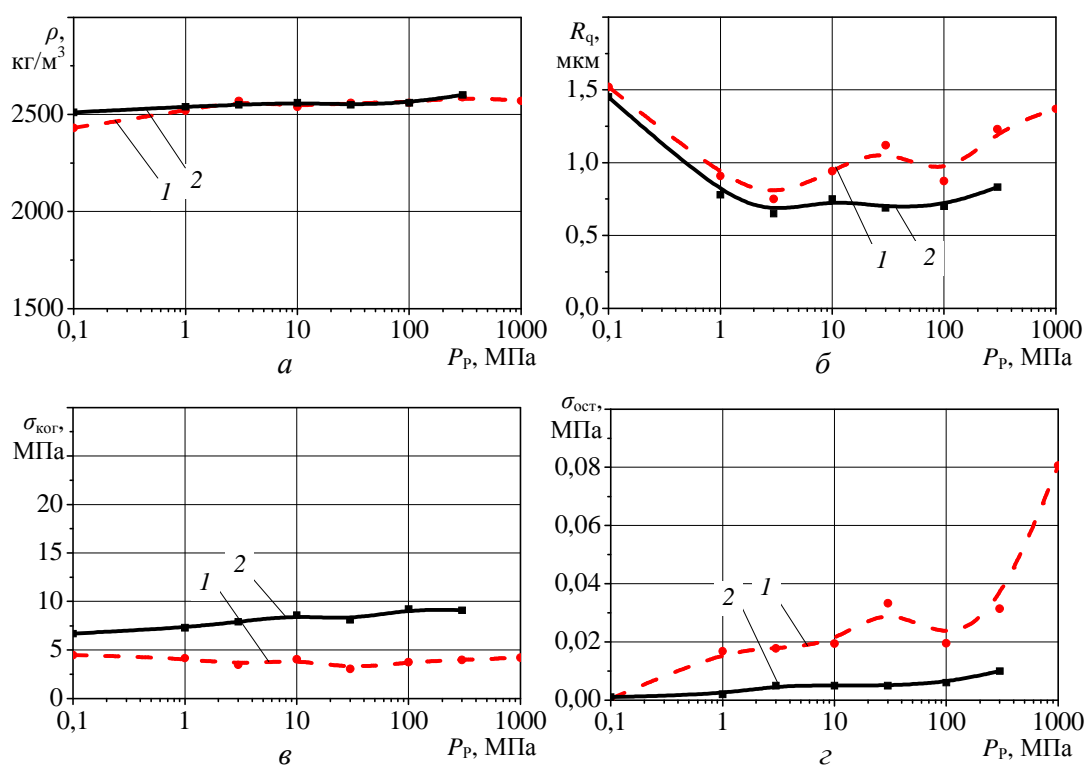


Рис. 3. Влияние давления обкатки ролика  $P_p$  на плотность образующегося покрытия (а); шероховатость поверхности (б); когезионную прочность покрытия (в) и величину остаточных напряжений (г): 1 – обкатка роликом без пропуска электрического тока; 2 – электромеханическая обработка роликом



Сравнивая линии 1 и 2 на рисунке 3, можно отметить, что использование электромеханической обработки, по сравнению с чисто механической обработкой, приводит к улучшению показателя  $R_q$  ориентировочно на 20 %, показателя  $\sigma_{\text{ког}}$  – примерно в 2 раза, показателя  $\sigma_{\text{ост}}$  – примерно в 3 раза.

Результаты компьютерного моделирования тепловой задачи комбинированного процесса представлены на рисунке 4.

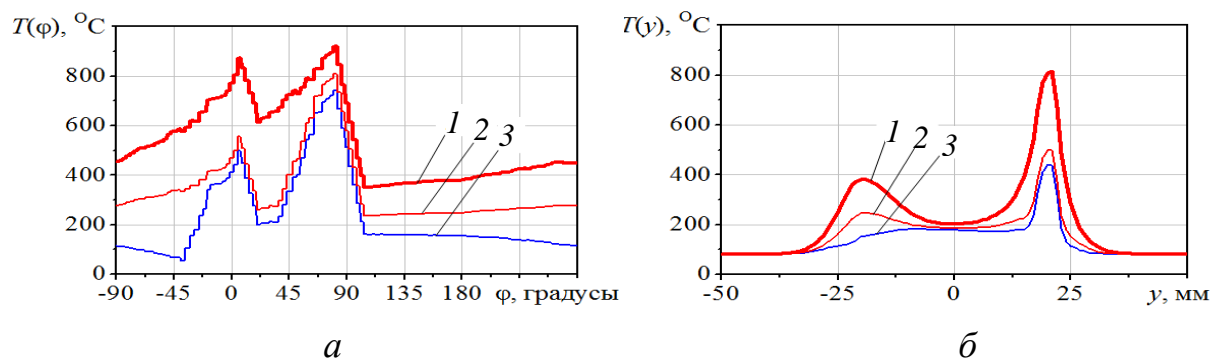


Рис. 4. Распределение температуры по поверхности вала  $T(\varphi)$  (а) и в поперечном сечении вала (в области "пятна нагрева плазмой")  $T(y)$  (б): 1, 2, 3 – режимы, соответствующие ПН с ЭМО без охлаждения, с охлаждением одной струей воды после плазмотрона и с двумя охлаждающими струями

Анализируя профили на рисунке 4 можно прийти к выводу, что каждая струя водяного охлаждения приводит к снижению средней температуры вдоль линии движения плазмотрона приблизительно на 150-200 °С. Использование двух струй водяного охлаждения (как после прохода плазмотрона, так и после прохода обкатывающего ролика), позволяет поддерживать среднюю температуру детали на приемлемом уровне (около 150 °С). Это не приводит к образованию существенных внутренних напряжений в окончательно сформированном покрытии. Поэтому в данном случае вероятность отслоения и растрескивания покрытия гораздо ниже, чем в случае отсутствия одного или двух этапов охлаждения.

## Выводы

Таким образом, проведенные оценки на основе компьютерного мо-

делирования позволяют заключить, что механическая (либо электромеханическая) обработка плазменного покрытия приводит к повышению его плотности ориентировочно на 10 % и снижению шероховатости ориентировочно вдвое. Электромеханическая обработка по сравнению с чисто механической, приводит к повышению когезионной прочности покрытия примерно вдвое и снижению остаточных напряжений в 2-5 раз.

Моделирование распространения тепла в деталях для способа комбинированного нанесения покрытия показало, что водяное охлаждение существенно понижает температуру поверхности детали, чем способствует образованию более прочного покрытия благодаря уменьшению внутренних напряжений в покрытии. В случае использования дополнительной электромеханической обработки поверхности целесообразно использовать две водяные струи охлаждения: после прохода плазмотрона и после прохода обкатывающего ролика.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Министерства образования и науки РФ (№ 7.4045.2011).

### Список литературы

1 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.

2 Багмутов, В. П. Исследование структуры и свойств наноматериалов, полученных комбинированной обработкой [Текст] / В. П. Багмутов, В. И. Калита, И. Н. Захаров, Иванов Е. Б., Захарова // Известия ВолГТУ. – Волгоград, 2008. – № 10. – С. 102-106.

3 Пат. 2338005 МПК С23С4/18 Способ комбинированного упрочнения деталей [Текст] / В. П. Багмутов, В. И. Калита, С. Н. Паршев, И. Н. Захаров ; заявитель и патентообладатель ВолГТУ. – № 2006145603/02; заявл. 20.12.2006 ; опубл. 10.11.2008.

4 Кадырметов А. М. Исследование процессов плазменного нанесения и упрочнения покрытий и пути управления их качеством / А. М. Кадырметов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2012. – №07(81). – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2012/07/pdf/25.pdf>, 1,125 у.п.л.

5 Станчев, Д. И. Математическая модель расчета температурного поля при плазменном напылении с одновременным оплавлением выносной модулируемой дугой цилиндрических деталей [Текст] / Д. И. Станчев, А. М. Кадырметов, В. Н. Бухтояров // Современные методы подготовки специалистов и совершенствование систем и средств

наземного обеспечения авиации: международный сборник научно-методических трудов (часть 1) – Воронеж, ВВАИИ, 2003. – С. 83-88.

6 Кочергин, К. К. Контактная сварка [Текст] / К. К. Кочергин. – Л. : Машиностроение, Ленингр. отд-ние. 1987. – 240 с.

7 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. – №87(03).– Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2013/03/pdf/30.pdf>, 0,813 у.п.л.

8 Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2013612101 от 14.02.13 г. 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. – №2012661430; заявл. 21.12.2012; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 14.02.2013.

### References

1 Kadyrmetov, A. M. Perspektivy uprochnenija pokrytij metodom plazmennogo napylenija s odnovremennoj jelektromehaničeskoj obrabotkoj [Tekst] / A. M. Kadyrmetov, V. O. Nikonov, V. N. Buhtojarov, E. V. Snjatkov, A. F. Mal'cev // Tehnologii uprochnenija, nanesenija pokrytij i remonta: teorija i praktika: V 2 chastjah : materialy 14-j mezhdunarodnoj nauchno-praktičeskoj konferencii. Chast' 1 – SPb: Izd-vo politehn. un-ta, 2012. – S. 75-79.

2 Bagmutov, V. P. Issledovanie struktury i svojstv nanomaterialov, poluchennyh kombinirovannoj obrabotkoj [Tekst] / V. P. Bagmutov, V. I. Kalita, I. N. Zaharov, Ivan-nikov E. B., Zaharova // Izvestija VolGTU. – Volgograd, 2008. – № 10. – S. 102-106.

3 Pat. 2338005 МПК C23C4/18 Sposob kombinirovannogo uprochnenija detalej [Tekst] / V. P. Bagmutov, V. I. Kalita, S. N. Parshev, I. N. Zaharov ; zajavitel' i patentoobladatel' VolGTU. – № 2006145603/02; zajavl. 20.12.2006 ; opubl. 10.11.2008.

4 Kadyrmetov A. M. Issledovanie processov plazmennogo nanesenija i uprochnenija pokrytij i puti upravlenija ih kachestvom / A. M. Kadyrmetov // Politematičeskij setevoj jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta (Nauchnyj zhurnal KubGAU) [Jelektronnyj resurs]. – Krasnodar: KubGAU, 2012. – №07(81). – Rezhim dostupa: <http://ej.kubagro.ru/2012/07/pdf/25.pdf>, 1,125 u.p.l.

5 Stanchev, D. I. Matematičeskaja model' rasčeta temperaturnogo polja pri plazmennom napylenii s odnovremennym oplavleniem vynosnoj moduliruemoj dugoj cilindričeskih detalej [Tekst] / D. I. Stanchev, A. M. Kadyrmetov, V. N. Buhtojarov // Sovremennye metody podgotovki specialistov i sovershenstvovanie sistem i sredstv nazemnogo obespečenija aviacii: mezhdunarodnyj sbornik nauchno-metodičeskih trudov (chast' 1) – Voronezh, VVAII, 2003. – S. 83-88.

6 Kochergin, K. K. Kontaktnaja svarka [Tekst] / K. K. Kochergin. – L. : Mashinostroenie, Leningr. otd-nie. 1987. – 240 s.

7 Kadyrmetov, A. M. Ocenka kachestva plazmennyh pokrytij, nanesennyh kombinirovannym metodom s obkatkoj rolikom, poluchennaja na osnove komp'juternogo modelirovanija / A. M. Kadyrmetov, V. I. Posmet'ev, V. O. Nikonov, V. V. Posmet'ev // Politematičeskij setevoj jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta (Nauchnyj zhurnal KubGAU) [Jelektronnyj resurs]. – Krasnodar: KubGAU, 2013. – №87(03).– Rezhim dostupa: <http://ej.kubagro.ru/2013/03/pdf/30.pdf>, 0,813 u.p.l.

8 Svidetel'stvo ob oficial'noj registracii programmy dlja JeVM №2013612101 ot 14.02.13 g. Programma dlja modelirovanija sposoba kombinirovannogo uprochnenija poverhnostej detalej [Tekst] / V. O. Nikonov, A. M. Kadyrmetov, V. I. Posmet'ev, V. V. Posmet'ev; pravoobladatel' FGBOU VPO VGLTA. – №2012661430; zajavl. 21.12.2012; zaregistrirvano v Reestre programm dlja JeVM 14.02.2013.