

DOI: 10.34220/2311-8873-2022-15-23



УДК 621.793.71

2.5.5 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОСНАЩЕНИЕ
ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПЛАЗМЕННОГО
НАПЫЛЕНИЯ ПО ПАРАМЕТРУ
СКОРОСТИ НАПЫЛЯЕМЫХ ЧАСТИЦ**

Плахотин Александр Александрович
младший научный сотрудник Военного
учебно-научного центра военно-воздушных
сил «Военно-воздушная академия имени
профессора Н.Е. Жуковского
и Ю.А. Гагарина» (РФ),
e-mail: vip.plahotin@mail.ru

Мандрыкин Игорь Александрович
аспирант 2 курса машиностроительного фа-
культета ФГБОУ ВО «Воронежский
государственный лесотехнический
университет имени Г.Ф. Морозова»,
г. Воронеж, РФ

✉¹**Кадырметов Анвар Минирович**
доктор технических наук, зав. кафедрой
машиностроительных технологий
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
лесотехнический университет имени
Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, РФ

Попов Петр Николаевич
аспирант ФГБОУ ВО «Воронежский
государственный лесотехнический
университет имени Г.Ф. Морозова»,
г. Воронеж, РФ

Болгов Андрей Вячеславович
студент 3 курса машиностроительного фа-
культета ФГБОУ ВО «Воронежский
государственный лесотехнический
университет имени Г.Ф. Морозова»,
г. Воронеж, РФ

Аннотация.

Работа посвящена вопросу оптимизации про-
цессов плазменного напыления покрытий по
критерию скорости напыляемых частиц, в вы-
сокой степени определяющей качество нано-
симых покрытий, и технологическому осна-
щению для этого с помощью, прежде всего,
дисковых приборов.

**TECHNOLOGICAL EQUIPMENT TO OP-
TIMIZE PLASMA SPRAYING ACCORDING
TO THE VELOCITY PARAMETER OF
SPRAYED PARTICLES**

Plahotin Aleksandr Aleksandrovich
junior researcher at the educational
and scientific center of the air force
"Air force academy named after
professor N.E. Zhukovsky
and Yu.A. Gagarin" (RF),
e-mail: vip.plahotin@mail.ru

Mandrikin Igor Aleksandrovich
2nd year postgraduate student of the faculty of
mechanical engineering, Federal State Budget
Educational Institution of Higher Education "Vo-
ronezh State University of Forestry and Technol-
ogies named after G.F. Morozov", Voronezh, RF

✉¹**Kadyrmetov Anvar Minirovich**
doctor of technical sciences, professor head.
department of engineering technologies Federal State
Budget Educational Institution of Higher Education
"Voronezh State University of Forestry and Technol-
ogies named after G.F. Morozov", Voronezh, RF

Popov Petr Nikolaevich
graduate student, Federal State Budget Educational
Institution of Higher Education "Voronezh State
University of Forestry and Technologies named after
G.F. Morozov", Voronezh, RF

Bolgov Andrei Vyacheslavovich
3rd year student of the faculty of mechanical
engineering, Federal State Budget Educational
Institution of Higher Education "Voronezh
State University of Forestry and Technologies
named after G.F. Morozov", Voronezh, RF

Annotation.

The work is devoted to the issue of optimizing the
processes of plasma spraying of coatings according
to the criterion of the speed of sprayed particles,
which is highly determining the quality of the ap-
plied coatings, and technological equipment for
this using, first of all, disk devices.

Ключевые слова: ПЛАЗМЕННОЕ НАПЫЛЕНИЕ, СКОРОСТЬ ЧАСТИЦ, ДИСКОВЫЙ ПРИБОР ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ.

Keywords: PLASMA SPRAYING, PARTICLE SPEED, DISK SPEED DETERMINATION.

¹Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Высокая надежность изделий определяется показателями сопротивляемости эксплуатационным нагрузкам их деталей [1-5]. Для защиты от эксплуатационных воздействий, воспринимаемых поверхностями деталей (износными, коррозионными и др.), используются защитные покрытия, а среди них наиболее часто – газотермические покрытия и, прежде всего, плазменные [6-14]. Защитные свойства плазменных покрытий определяются их качеством (физико-механическими и триботехническими свойствами), которое, в свою очередь, определяется факторами технологического процесса плазменного напыления [10-12]. Контроль технологического процесса плазменного напыления по качеству покрытий (по физико-механическим и триботехническим свойствам) относится к методам разрушающего контроля и является трудоемким и дорогостоящим. Поэтому интерес представляет неразрушающий метод контроля плазменного напыления по газодинамическим параметрам – по скорости и температуре частиц. Эта возможность обусловлена непосредственной связью этих параметров со свойствами получаемых покрытий [10, 15, 16]. Известными методами определения скорости напыляемых частиц в плазменной струе являются оптические методы [11, 18] и методы с использованием дискового прибора [8, 19]. Оптические методы требуют использования программного обеспечения для обработки данных по профилю и сечениям струи. Дисковые приборы являются простыми при использовании, дешевыми и не требуют относительно трудоемкой настройки и обработки данных, т.к. позволяют по анализу напыленного фрагмента определить распределение скоростей частиц.

2 Материалы и методы

Определение скоростей напыляемых частиц в плазменной струе двухдисковым прибором, диски которого расположены перпендикулярно оси струи, основывается на знании скорости вращения дисков и определении угла поворота нижнего диска β после того, как порция газа с частицами струи пролетает через отверстие в верхнем диске [8, 19]. Этот угол равен углу между проекцией радиальной прямой верхнего диска, проходящей через пропускное отверстие в нем, на нижний диск и радиальной прямой на нижнем диске, проходящей через середину пятна напыления. На основе данного принципа было изготовлено устройство, которое представлено на рисунке 1.

Устройство содержит двигатель мощностью более 180 Вт. Скорость вращения диска устройства – до 16000 об/мин. Диагностическая система устройства включает в себя электромагнитный датчик, соединенный с частотомером, для измерения частоты вращения диска и угломер с нониусом – для измерения углов передних фронтов газа и частиц в отделенных от плазменной струи газодисперсных порциях. Электромагнитный датчик совместно с частотомером определяли моменты прохождения магнитов дисков около датчика и частоту вращения дисков. Погрешности измерений данных параметров не превышали 1 %.

Скорость частиц $V_{\text{ч}}$ рассчитывалась по формуле:

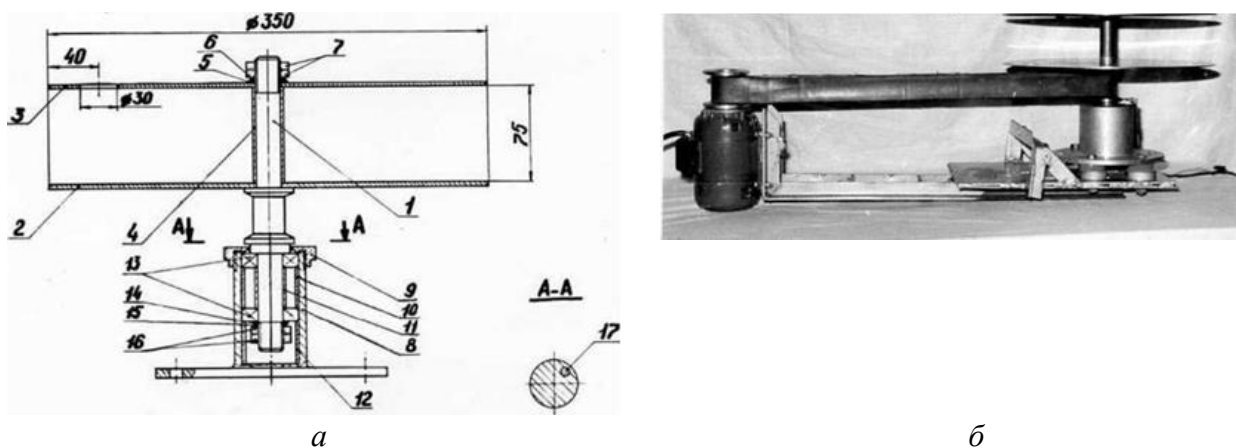
$$V_{\text{ч}} = \frac{360 \cdot N \cdot H}{\beta}, \quad (1)$$

где H – расстояние между дисками, N – частота вращения дисков.

Оценка методической погрешности прибора по данным работы [19] показывает, что при выполнении соотношения $H/d < (5 \dots 7)$, скорость частиц в центре пятна напыления практически равна скорости, определённой по формуле (1), где d – диаметр отверстия верхнего диска. При $H/d \approx (10 \dots 12)$ скорость частиц определяется с погрешностью около 10 %, при этом рост H/d приводит к занижению расчетной скорости относительно фактической.

Более эффективны дисковые приборы, дающие возможность одновременного определения скоростей газовой фазы и напыляемых частиц [20-21] (рис. 2). Данные приборы позволяют определить влияние запыленности газового потока частицами на скорость газовой фазы. Для этого дополнительно проводят измерение скорости потока без частиц. Приводы включают в себя двигатель 1, вал дисковый 2, диск 3. В процессе генерации плазменной струи б последняя пересекает отверстие диска 3 при каждом его обороте и отделяет от себя порции газа с частицами. Регулирование объема газозапыленных порций осуществляется частотой вращения вала 2.

Определение скоростей фаз дисковыми устройствами, изображенными на рисунке 2 имеют отличия и свои преимущества и недостатки.



a – конструктивная схема; *б* – внешний вид;

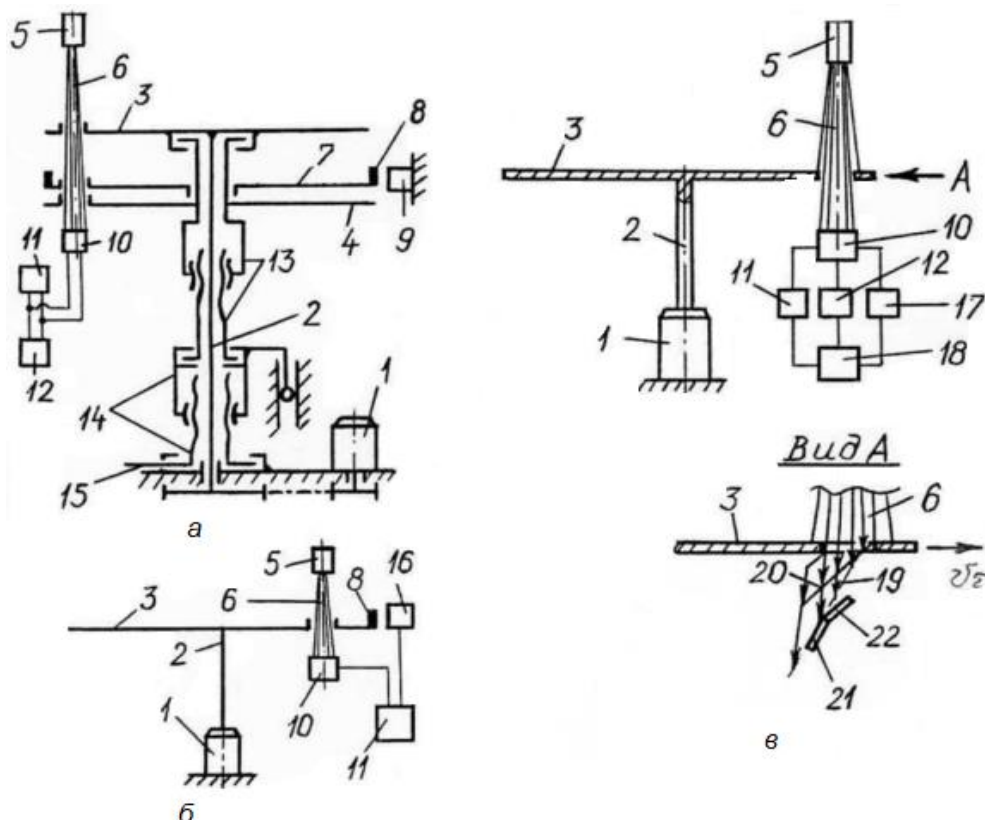
1 – вал; 2, 3 – диски; 4, 10, 11, 12 – втулки; 5, 14 – шайбы; 6, 15 – шайбы гровера; 7, 16 – гайки; 8 – основание; 9 – гайка накидная; 13 – подшипник; 17 – магнит

Рисунок 1 – Дисковый прибор для определения скоростей дисперсной фазы

В устройстве "а" (рис. 2, а) [21] скорости фаз определяют в порядке: 1 – скорость газовой фазы, 2 – скорость частиц. Скорость газовой фазы определяют во время генерированной плазменной струи путем вращения нижнего диска 4 вместе с экраном 7 с помощью винта 15 относительно верхнего диска 3. Вращение осуществляют на центральный угол α , при котором датчиком 10 формируются максимальные амплитуды импульсов. Скорость частиц определяется при открытом нижнем диске 4 (вращательным смещением экрана 7 системой электромагнита 9 с сердечником 8) по центральному углу β . Скорость частиц рассчитывают по формуле (1), а газовой фазы – по формуле:

$$V_{\text{ч}} = \frac{360 \cdot N \cdot H}{\alpha} \quad (2)$$

В дисковом устройстве "б" (рис. 2, б) скорости газа и частиц определяли по времени пролета порций газа и частиц от диска 3 до акустического датчика 10 (ЛХ-610) при известном расстоянии между ними. Сигнал от датчика оборотов 16, фиксирующий моменты прохождения газодисперсных порций через отверстие диска 3, подается на первый канал осциллографа, а сигнал от акустического датчика 10 – на второй. Время пролета газовой фазы и



- 1 - двигатель; 2 - вал; 3, 4 - диски; 5 - плазмотрон; 6 - плазменная струя; 7 - защитный экран; 8 - магнит; 9 - индуктор; 10 - датчик газа и частиц; 11 - осциллограф; 12 - частотомер; 13, 14 - винтовые передачи; 15 - угломер; 16 - датчик оборотов; 17 - угломер; 18 - счётное устройство; 19, 20 - передние фронты отделённых порций газа и частиц; 21, 22 - чувствительные элементы датчика давления; v_t - окружная скорость диска; а - определение центральных углов, образованных радиальной прямой, проходящей через отверстие верхнего диска, с радиальными линиями, проходящими через отверстие на нижнем диске и пятно напыления; б - определение времени пролёта частицами известного расстояния от диска до датчика; в - определение углов передних фронтов отделяемых порций газа и частиц

Рисунок 2 – Дисковые устройства для определения скоростей фаз плазменной струи

частиц определяют на осциллограмме по расстояниям между импульсами на первом и втором каналах осциллографа. Погрешность измерения составили: менее 12 % для измерений времени и 1 % – для расстояния.

Расчет скоростей фаз в устройстве "в" (рис. 2, в) [20] осуществлялся с использованием измеренных углов передних фронтов газовых порций γ_2 и частиц γ_4 при известном расстоянии D_0 от оси отверстия диска 3 до оси его вращения по формуле:

$$v = \pi \cdot D_0 \cdot N \cdot \operatorname{tg} \gamma. \quad (3)$$

Устройства "б" и "в" имеют обеспечивают меньшее возмущающее воздействие на отделяемые газодисперсные порции, по которым оценивают скорости газа и частиц, но они имеют недостаток, заключающийся в том, что акустические датчики работают в более жестких температурных и механических условиях воздействия на них помимо газовой фазы еще и частиц. Погрешности определения скоростей устройств не превышали 5 % по газовой и дисперсным фазам. В первом случае для однофазной струи погрешность оценивалась сравнением с показаниями, полученными с помощью трубки Пито. Во втором случае – с данными дискового прибора (рис. 1).

3 Результаты исследований

Устройства для определения скоростей газа и частиц плазменной струи, изображенные на рисунке 2 [20, 21] в сравнении с обычным двухдисковым устройством определяют скорости газовой и напыляемых частиц за один акт измерения, обеспечивая более высокую производительность нахождения оптимальных режимов напыления.

Способ и устройство по патенту [20] имеет преимущество в сравнении с патентом [20] в отношении меньшей методической погрешности, что обусловлено использованием одного диска вместо двух и соответственно двумя присоединенными к диску воздушными потоками вместо четырех для двух дисков. Для определения скоростей газа и частиц потока при плазменном напылении было использовано заявляемое устройство. Напыление проводилось воздушным плазматроном ЭДП-104 с длиной анода 100 мм на режиме:

- расход воздуха, приведенный к нормальным условиям, – 70 л/мин;
- ток дуги – 100 А;
- напряжение на дуге – 130 В;
- расстояние от анодного сопла до диска – 150 мм;

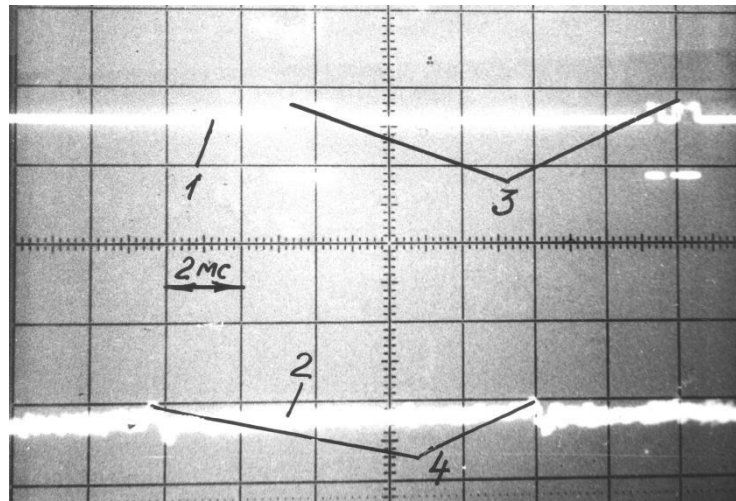
– расстояние от диска до поверхности акустического датчика – 40 мм. Для напыления использовался порошок ПГСР-3 (никель-хромовый с флюсующими добавками бора и кремния) с размером частиц 63-100 мкм и расходом 2 кг/ч.

Диаметр диска, диаметр окружности, на которой располагалось отверстие, и диаметр отверстия составляли соответственно 350, 270 и 30 мм. Угол между радиальными линиями диска, на которых располагались отверстие и магнит поз. 8, составлял 140 градусов, а аналогичный угол между акустическим датчиком поз. 10 и герконом датчика оборотов поз. 16 – 90 градусов. Это соответствует тому, что при вращении магнит поз. 8 проходит около геркона после того, как диск повернется на 130 градусов после прохождения отверстием диска плазменной струи. Скорость вращения диска в эксперименте была равна 5500 об/мин. В качестве датчика вращения диска использовался геркон. В качестве датчика скоростей частиц и газа использовался акустический датчик ЛХ-610. В эксперименте использовался двухканальный осциллограф С1-83.

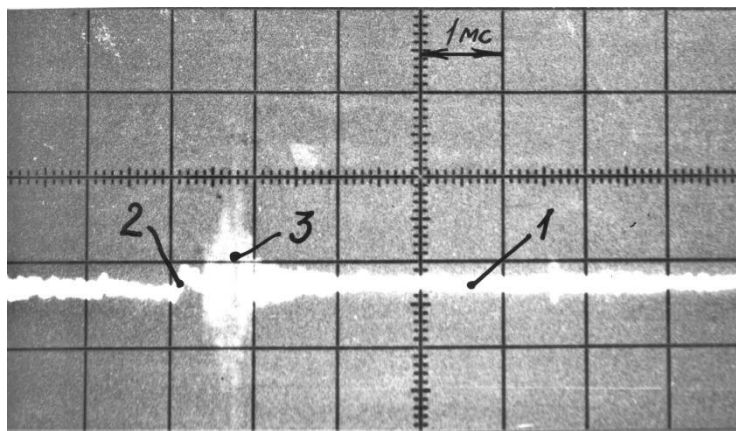
Для идентификации сигналов, возникающих от воздействия на мембрану акустического датчика газовой и дисперсной фаз, предварительно исследовалась плазменная струя без подачи порошка. В результате были получены фотографии, изображенные на рисунке 3, а.

Верхний луч на этих фигурах соответствует сигналу от геркона, а нижний – от акустического датчика, на котором хорошо видны импульсы от воздействия на него порций газа. Масштаб по оси времени составляет 2 мс/дел. Анализ осциллограмм приводит к величине скорости струи ~ 290 м/с, что хорошо согласуется с величиной скорости, полученной измерением с помощью водоохлаждаемой трубки Пито.

Затем подавался порошок. В связи с тем, что использовался двухканальный, но одноручевоый осциллограф С1-83 (в режиме работы переключения луча с одного канала на другой), то для того, чтобы четче выделить возмущения акустического датчика от воздействия порций частиц, осциллограф переводился в одноканальный режим работы. На рисунке 3, б представлены осциллограммы сигнала от акустического датчика для этого случая. На этих фигурах хорошо видны предварительно проидентифицированные импульсы от воздействия на акустический датчик порций газа (рис. 3, а) и последующие за ними серии (пакеты) импульсов от воздействия частиц. Масштаб по времени в этом случае составляет 1,0 мс/дел. Анализ этих осциллограмм приводит к величине скорости частиц ~ 70 м/с, что хорошо согласуется с данными, полученными измерением скорости частиц с помощью дискового прибора, состоящего из двух дисков, верхний из которых имеет отверстие.



a



б

1 – сигнал от геркона; 2 – сигнал от акустического датчика; 3 – импульсы, соответствующие замыканию контактов геркона; 4 – импульсы акустического датчика от воздействия на него порций газа

Рисунок 3 – Осциллограммы сигналов акустического датчика от воздействия газовой фазы (*a*) и частиц (*б*)

4 Обсуждение и заключение

Дисковые приборы с использованием акустических датчиков для газодинамической диагностики плазменной струи обеспечивают возможность одновременного измерения скоростей газовой и дисперсной фаз и повышают, тем самым, информативность и производительность исследований плазменного напыления и оптимизации его процессов. Преимуществом способа в сравнении с двухдисковым устройством является расширенный диапазон измерения скоростей частиц начиная с меньших значений. Это обусловлено уменьшением количества дисков с двух до одного, что снижает возмущающее воздействие присоединенных к дисковым поверхностям потоков на измеряемые порции газов и частиц с четырех потоков для двух дисков до двух потоков для одного диска. Это позволяет повысить информативность и производительность исследований процессов плазменного напыления и поиска оптимальных режимов по критерию скорости напыляемых частиц.

Список литературы

1 Когаев, В. П. Прочность и износостойкость деталей машин / В. П. Когаев, Ю. Н. Дроздов. – М. : Высшая школа, 1991. – 319 с.

- 2 Соснин, Н. А. Плазменные технологии. Руководство для инженеров / Н. А. Соснин, С. А. Ермаков, П. А. Тополянский. – СПб : Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 406 с.
- 3 Сидоров, А. И. Восстановление деталей машин напылением и наплавкой / А. И. Сидоров. – М. : Машиностроение, 1987. – 192 с.
- 4 Черноиванов, В. И. Организация и технология восстановления деталей машин / В. И. Черноиванов. – М. : Агропромиздат, 1989. – 336 с.
- 5 Антошин Е. В. Газотермическое напыление покрытий. – М. : Машиностроение, 1974. – 96 с.
- 6 Кудинов, В. В. Нанесение покрытий плазмой / В. В. Кудинов, П. Ю. Пекшев, В. Е. Белашенко и др. – М. : Наука, 1990. – 480 с.
- 7 Борисов, Ю. С. Газотермические покрытия из порошковых материалов : Справочник / Ю. С. Борисов, Ю. А. Харламов, С. Л. Сидоренко, Е. Н. Ардатовская. – К. : Наук. думка, 1987. – 544 с.
- 8 Донской, А. В. Электроплазменные процессы и установки в машиностроении / А. В. Донской, В. С. Клубникин. – Л. : Машиностроение, 1979. – 221 с.
- 9 Петров, С. В. Плазма продуктов сгорания в инженерии поверхности / С. В. Петров, А. Г. Сааков. – Киев : ТОПАС. – 2000. – 220 с.
- 10 Пузряков, А. Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления : Учеб. пособие по курсу «Технология конструкций из металлокомпозитов» / А. Ф. Пузряков. 2-е изд., перереб. и доп. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. – 360 с.
- 11 Хасуй, А. Техника напыления. Пер. с японского / А. Хасуй. – М. : Машиностроение, 1975. – 288 с.
- 12 Анциферов, В. Н. Порошковая металлургия и напыленные покрытия : Учебник для вузов / В. Н. Анциферов, Г. В. Бобров, Л. К. Дружинин и др. – М. : Металлургия, 1987. – 792 с.
- 13 Балдаев, Л. Х. Газотермическое напыление: учебное пособие / Л. Х. Балдаев, В. Н. Борисов, В. А. Вахалин, Г. И. Ганноченко, А. Е. Затока, Б. М. Захаров, А. В. Иванов, В. М. Иванов, В. И. Калита, В. В. Кудинов, А. Ф. Пузряков, Ю. П. Сборщиков, Б. Г. Хамицев, Э. Я. Школьников, В. М. Ярославцев : под общей ред. Л. Х. Балдаева. – М. : Маркет ДС, 2007 – 344 с.
- 14 Барвинок, В. А. Управление напряженным состоянием и свойства плазменных покрытий / В. А. Барвинок. – М. : Машиностроение, 1990. – 384 с.
- 15 Сухочев, Г. А. Экспериментальные исследования параметров управляемости процесса воздушно-плазменного нанесения и упрочнения покрытий / Г. А. Сухочев, А. М. Кадырметов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2008. – № 11(47) . – С. 53-56.
- 16 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>.
- 17 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>.
- 18 Кадырметов, А. М. Исследование технологии плазменного напыления в условиях модуляции теплофизических параметров потока с применением оптической диагностики характеристик дисперсной фазы напылительной струи [Электронный ресурс] / А. М. Кадырметов, И. П. Гуляев, А. В. Долматов, В. И. Кузьмин, Е.В. Снятков, А. С. Пустовалов // Воронежский научно-технический вестник. – 2016. – №2(16). – С. 16-23. – режим доступа:

http://vestnikvgtlta.ru/arhiv/2016/2/3_2_16_2016.pdf.

19 Гасин, Д. А. О возможностях метода вращающихся дисков в изучении свойств напыляемых частиц / Д. А. Гасин, Масловский Н. М., Урюков Б. А. // Физика и химия обработки материалов. – 1987. – № 5. – С. 66-70.

20 Пат. 2029308 (Россия), МКИ(6) G 01 P 5/00. Способ определения скорости потока и устройство для его осуществления / А. М. Кадырметов, Д. И. Станчев, Ю. П. Земсков, А. П. Лукьянчук, А. В. Кузнецов ; заявитель и патентообладатель Воронеж. лесотехн. ин-т. – № 5020052/10 ; Заявл. 03.01.92 ; Оpubл. 20.02.95, Бюл. № 5. – 7 с.

21 Пат. 2063638 (Россия), МКИ(6) G 01 P 5 / 18. Устройство для определения скоростей двухфазного потока / А. М. Кадырметов, В. И. Посметьев, Д. И. Станчев, А. П. Лукьянчук ; заявитель и патентообладатель Воронеж. лесотехн. ин-т. – №93031664 / 28; Заявл. 15.06.93 ; Оpubл. 10.07.96, Бюл. № 19. – 7 с.

References

1 Kogogaev, V. P. The strength and wear resistance of the parts of the machines / V. P. Kogogaev, Yu. N. Drozdov. – M. : Higher School, 1991. – 319 p.

2 Sosnin, N. A. plasma technologies. Guide for engineers / N. A. Sosnin, S. A. Ermakov, P. A. Topolyansky. – St. Petersburg: Publishing House Polytechnic. University, 2008. – 406 p.

3 Sidorov, A. I. Restoration of the parts of cars with spraying and surfacing / A. I. Sidorov. – M. : Mechanical Engineering, 1987. – 192 p.

4 Chernorivanov, V. I. Organization and technology for the restoration of cars of machines / V. I. Chernorivanov. – M. : Agropromizdat, 1989. – 336 p.

5 Antoshin E. V. Bashertermic spraying of coatings. – M. : Mechanical Engineering, 1974. – 96 p.

6 Kudinov, V. V. Plasma coatings / V. V. Kudinov, P. Yu. Pechev, V. E. Belashchenko and others – M. : Science, 1990. – 480 p.

7 Borisov, Yu. S. Gas-termining coatings from powder materials: reference / Yu. S. Borisov, Yu. A. Kharlamov, S. L. Sidorenko, E. N. Ardatovskaya. – K. : Sciences. Dumka, 1987. – 544 p.

8 Donskoy, A. V. Electric plasma processes and installations in mechanical engineering / A. V. Donskoy, V. S. Klubnikin. – L. : Mechanical Engineering, 1979. – 221 p.

9 Petrov, S. V. Plazm of combustion products in the engineering of the surface / S. V. Petrov, A. G. Saakov. – Kyiv : Topas. – 2000. – 220 p.

10 Puzryakov, A. F. Theoretical foundations of the technology of plasma spraying : Textbook. Manual on the course "Technology of structures made of metal-composites" / A. F. Puzryakov. 2nd ed., Re-sore. and add. – M. : Publishing House MSTU named after N. E. Bauman, 2008. – 360 p.

11 Khasui, A. Technique of spraying. Per. with Japanese / A. Hasui. – M. : Mechanical Engineering, 1975. – 288 p.

12 Antsiferov, V. N. Powder metallurgy and sprayed coatings : a textbook for universities / V. N. Antsiferov, G. V. Bobrov, L. K. Druzhinin and others – M. Metallurgy, 1987. – 792 p.

13 Baldaev, L. Kh. Bashertmic spraying: Textbook / L. H. Baldaev, V. N. Borisov, V. A. Vakhalin, G. I. Gannochenko, A. E. Zatoka, B. M. Zakharov, A. V. Ivanov, V. M. Ivanov, V. I. Kalita, V. V. Kudinov, A. F. Puzryakov, Yu. P. Puppeters, B. G. Khamiths, E. Ya. Schoolboards, V. M. Yaroslavtsev : Under the general ed. L. H. Baldaeva. – M. : Market DS, 2007 – 344 p.

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

15 Sukhochev, G. A. Experimental studies of the parameters of controllability of the process of air-plasma application and hardening of coatings / G. A. Sukhochev, A. M. Kadyrmetov // Single

Technologies and Coating. – 2008. – № 11 (47). – S. 53-56.

16 Kadirmetov, A. M. Study of the processes of plasma application and strengthening of coatings and ways to manage their quality / A. M. Kadirmetov // Politematic Network Electronic Scientific Journal of the Kuban State Agrarian University (Scientific Journal of KubGAU) [Electronic resource]. – Krasnodar : Kubbau, 2012. – № 07 (81). – Access mode : <http://ej.kubagro.ru/2012/07/pdf/25.pdf>.

17 Kadirmetov, 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. Smotyev, V. O. Nikonov, V. V. Smotyev / Politematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University (KubGAU scientific journal) [Electronic resource]. – Krasnodar: Kubbau, 2013. – № 03 (87). – Access mode : <http://ej.kubagro.ru/2013/03/pdf/30.pdf>.

18 Kadirmetov, A. M. Study of plasma spraying technology in conditions of modulation of thermophysical flow parameters using the optical diagnosis of the characteristics of the dispersed phase of the spray stream [Electronic resource] / A. M. Kadirmetov, I. P. Gulyaev, A. V. Dolmatov, V. I. Kuzmin, E. V. Venatkov, A. S. Pustovalov // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. – 2016. – № 2 (16). – S. 16-23. – Access mode : http://vestnikvglta.ru/arhiv/2016/2/3_2_16_2016.pdf.

19 Gasin, D. A. On the possibilities of the method of rotating discs in the study of the properties of sprayed particles / D. A. Gasin, Maslovsky N. M., Uryukov B. A. // Physics and chemistry of materials processing. – 1987. – № 5. – S. 66-70.

20 Pat. 2029308 (Russia), MKI(6) G 01 P 5/00. A method for determining the flow rate and a device for its implementation / A. M. Kadyrmetov, D. I. Stanchev, Yu. P. Zemskov, A. P. Lukyanchuk, A. V. Kuznetsov; applicant and patent holder Voronezh. forest engineering in-t. – №. 5020052 / 10 ; Appl. 01.03.92 ; Published 20.02.95, Bull. № 5 – 7 p.

21 Pat. 2063638 (Russia), MKI(6) G 01 P 5 / 18. A device for determining the velocities of a two-phase flow / A. M. Kadyrmetov, V. I. Posmetiev, D. I. Stanchev, A. P. Lukyanchuk ; applicant and patent holder Voronezh. forest engineering in-t. – № 93031664 / 28 ; Appl. 06.15.93 ; Published 10.07.96, Bull. № 19. – 7 p.

© Плахотин А.А., Мандрыкин И.А., Кадырметов А.М., Попов П.Н, Болгов А.В., 2022