

УДК 621.791.92

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УСТРОЙСТВА ДЛЯ СВЕРХЗВУКОВОЙ ГАЗОПОРОШКОВОЙ НАПЛАВКИ

**М.В. Радченко, Д.А. Нагорный, Ю.О. Шевцов,
Т.Б. Радченко, В.С. Киселев**

Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова, г. Барнаул

В работе изложены основные этапы исследовательских работ по разработке устройства для реализации сверхзвуковой газопорошковой наплавки.

Ключевые слова: газопорошковая наплавка, аппаратура, расчет сопел, технологические характеристики.

DEVELOPMENT AND STUDY TECHNOLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE SUPERSONIC GAS-POWDER SURFACING DEVICE

**M.V. Radchenko, D.A. Nagorny, Yu.O. Shevtsov,
T.B. Radchenko, V.S. Kiselev**

The Altai state technical university of I.I. Polzunov, Barnaul

The paper presents the main stages of research work on the development of a device for the implementation of supersonic gas-powder surfacing.

Keywords: gas-powder surfacing equipment, nozzle calculation, process characteristics.

Известно, что прочность сцепления с металлом подложки и другие качественные характеристики наносимых покрытий напрямую зависят от выбранного способа их нанесения. При этом наибольшей прочностью сцепления и отсутствием пористости обладают покрытия, нанесенные на поверхность путем наплавки, ввиду формирования монолитного соединения металла покрытия с основой путем их пограничного сплавления и формирования металлической связи, что является критерием высокого качества [13-18].

Разработан способ газопорошковой наплавки (ГП-наплавки), обладающий максимальной простотой, мобильностью и универсальностью применения при низких материальных затратах на реализацию. Однако ряд серьезных недостатков, обусловленных низкой концентрацией тепловой энергии газового пламени, приводит к формированию неоднородных покрытий с нестабильными качественными характеристиками. Вследствие этого, область практического применения ГП-наплавки весьма ограничена.

Повысить качественные показатели наплавочных покрытий возможно только при увеличении плотности газопламенной струи, а

также её фокусировке в пятне нагрева. При этом единственным техническим решением, позволяющим сконцентрировать тепловой поток в пятне нагрева, является использование сверхзвуковых сопел (сопел Лаваля), которые формируют сжатый газопламенный поток за счет его высокой скорости истечения из среза сопла.

Однако на практике в роли инструмента для нанесения покрытий сверхзвуковые сопла получили основное применение только в установках для сверхзвукового газопорошкового напыления, где главной целью является не концентрация тепловой энергии в пятне нагрева, а увеличение скорости разгона частиц напыляемого покрытия. При этом существующее оборудование для сверхзвукового напыления предназначено для нанесения порошковых материалов и сплавов сверхмелких фракций (2-25 мкм), выпускаемых только за рубежом и превосходящих по стоимости отечественные порошковые материалы с минимальным размером фракции 40-100 мкм (ОМ) в 4-5 раз.

Учитывая вышеизложенное, целью работы, является разработка устройства для сверхзвуковой газопорошковой наплавки

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УСТРОЙСТВА ДЛЯ СВЕРХЗВУКОВОЙ ГАЗОПОРШКОВОЙ НАПЛАВКИ

(СГП-наплавки) покрытий порошковыми сплавами системы Ni-Cr-B-Si с размером фракции 40-100 мкм, с использованием сопел Лаваля для концентрации газопламенного потока в пятне нагрева, а также последующее исследование технологических характеристик данного наплавочного устройства. Данные исследования выполнены в рамках программы СТАРТ-2005, а также гранта Губернатора Алтайского края для поддержки инновационной деятельности машиностроительных предприятий края за 2016 год, выполненного ООО «Головной аттестационный центр Алтайского региона Национальной ассоциации Контроля и Сварки».

Для расчета, разработки и анализа характеристик сверхзвуковых сопел и других составляющих элементов устройства для СГП-наплавки, был разработан алгоритм (рисунок 1).

Износостойкость покрытий исследовались с помощью испытаний на сопротивление механическому изнашиванию о закрепленные частицы [1].

В качестве наплавочного материала был выбран самофлюсующийся сплав ПГ-СРЗОМ (ГОСТ 21448-75) системы Ni-B-Cr-Si, обладающий комплексом прочностных и технологических свойств, обеспечивающих широкий диапазон применения получаемых покрытий [2].

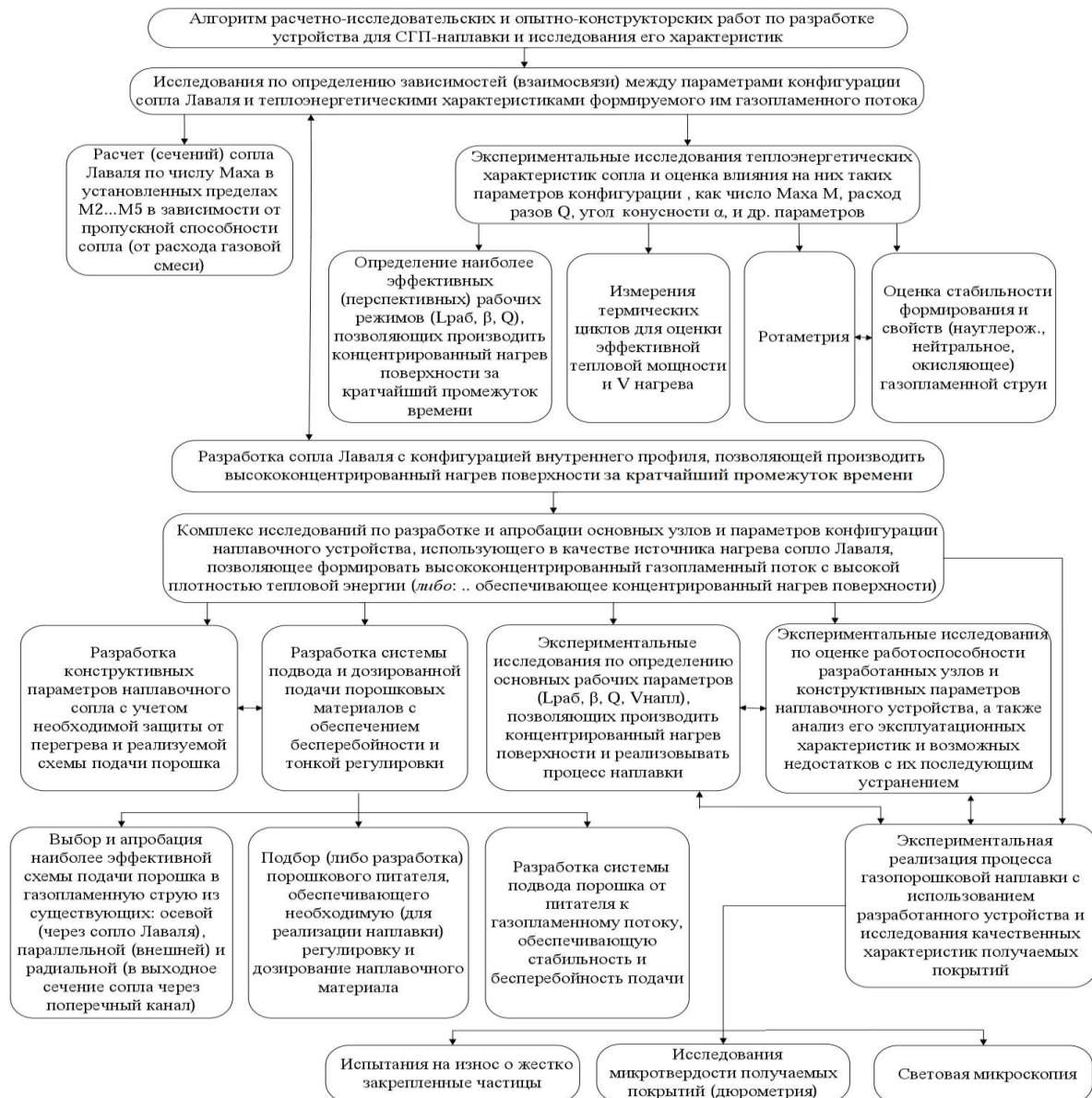


Рисунок 1 – Алгоритм разработки устройства для СГП-наплавки

В качестве базовой технологической аппаратуры для проведения исследований была использована универсальная установка для газопорошкового нанесения покрытий «КЕДР», а также горелка ГН-5П.

Термоциклирование и определение эффективной тепловой мощности газопламенных потоков проводилось с помощью хромель-алюмелевых термопар. Измерения фиксировались с помощью системы автоматизации «MasterSCADA». Эффективная тепловая мощность газопламенных струй рассчитывалась с помощью уравнения приращения температуры в пластине от мгновенного неподвижного линейного источника.

Расчет сечений для сопел Лавалья с различными числами Маха M , исходя из максимально-допустимого расхода газовой смеси [3], производился в соответствии с уравнением неразрывности (уравнение постоянства расхода) [4]:

$$G_m = pwF = p_{kp} w_{kp} F_{kp}, \quad (1)$$

где G_m - массовый расход газов; ρ_{kp} - плотность газа в критическом сечении сопла; w_{kp} - скорость в критическом сечении (равна скорости звука); F_{kp} - площадь критического сечения сопла.

В результате расчётно-экспериментальных исследований теплоэнергетических характеристик газопламенных струй, формируемых соплами с различными числами Маха, было установлено, что значительное увеличение концентрации тепловой энергии в пятне нагрева и снижение расхода газовой смеси при стабильном истечении газовых потоков, позволяют сопла с числами Маха $M4$ и $M5$ (рисунки 2).

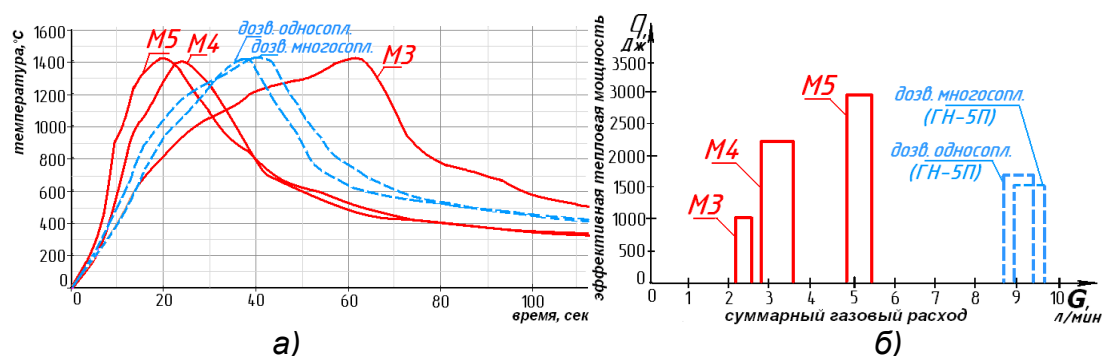


Рисунок 2 - Теплоэнергетические и эксплуатационные характеристики сопел:
а – термические циклы при нагреве до температуры «запотевания»; б - гистограмма эффективной тепловой мощности и расхода газовой смеси

Результаты исследований показали, что сопло с числом Маха $M5$ обладает наиболее перспективными теплоэнергетическими и эксплуатационными характеристиками, в числе которых максимальная эффективная тепловая мощность (порядка 2830...2910 Дж) и локализация нагрева, при стабильном формировании газопламенного потока, позволяющем регулировать его мощность в широком диапазоне. При этом важно отметить, что наибольшее, в сравнении с другими апробируемыми соплами Лавалья, т.н. «рабочее» расстояние нагрева (от среза сопла до обрабатываемой поверхности) порядка 10...25 мм позволяет снизить давление газопламенного потока на нагреваемую поверхность. Это в свою очередь при реализации процесса наплавки способствует более равномерному формированию слоя наплавляемого покрытия без выдувания жидкого металла из зоны наплавки. В

результате установлено, что наиболее работоспособной схемой, позволяющей реализовать процесс СГП-наплавки с помощью сверхзвукового сопла ($M5$) для обеспечения геометрически равномерного слоя формируемого покрытия и высокого коэффициента использования порошка, является схема с радиальной подачей порошкового износостойкого сплава в закритический участок сопла Лавалья. В ходе экспериментальной реализации СГП-наплавки с помощью сопла Лавалья $M5$ было установлено, что зона с высокой концентрацией тепловой энергии газопламенного потока находится на участке формирования ядра пламени, расположенном при выходе из участка расширения сопла Лавалья (y сопла $M5$ с $d_{кр} = 1,2$ мм $L_{ядра} \approx 15...25$ мм). После прохождения этого участка тепловая мощность газопламенного потока резко падает и не позволяет эффективно нагревать поверхность и

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УСТРОЙСТВА ДЛЯ СВЕРХЗВУКОВОЙ ГАЗОПОРШКОВОЙ НАПЛАВКИ

быстро расплавлять материал для наплавки. На основании полученных результатов была разработана и защищена патентом конструкция наплавочного сопла и способ СГП-наплавки [5, 6] (рисунок 3).

В ходе реализации СГП-наплавки с использованием данного сопла было достигнуто формирование равномерно наплавленных

слоев с высоким коэффициентом использования порошковых материалов. Разработана бесперебойная система подачи порошковых материалов, обеспечивающая точное порционное регулирование количества подаваемого порошкового сплава [19-22].

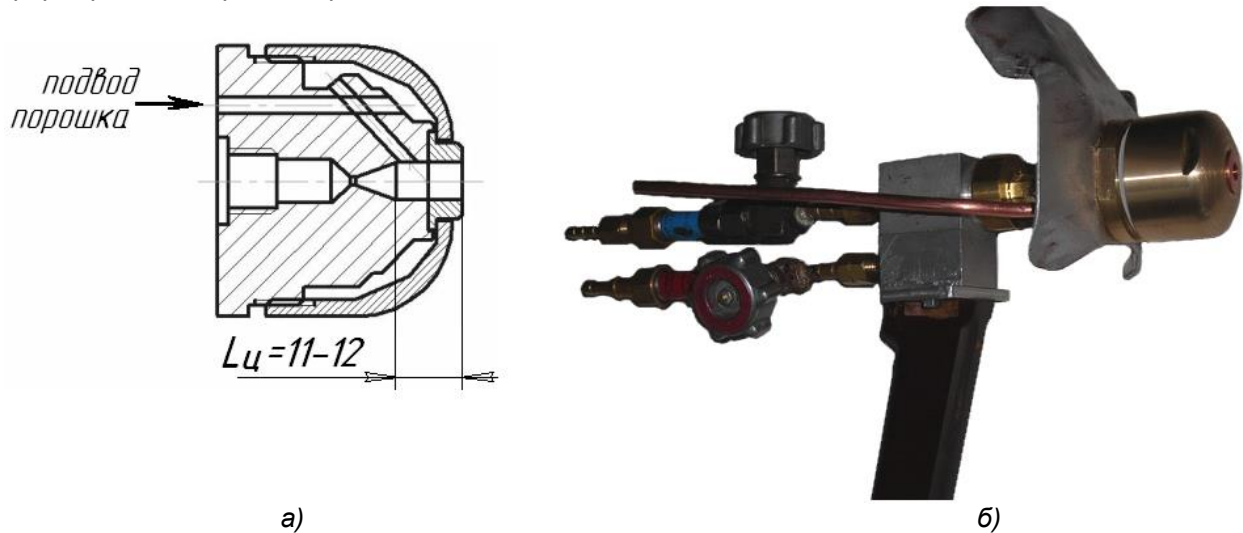


Рисунок 3 - Универсальное устройство для СГП-наплавки: а - схема сопла для СГП-наплавки; б – наплавочное устройство с универсальным соплом в сборе

Проведенные исследования (рисунок 4) свидетельствуют о том, что износостойкость покрытий, выполненных СГП-наплавкой, примерно в 1,8...3,2 раза выше износостойкости образцов, выполненных дозвуковой ГП-наплавкой.

Совместно с предприятием-изготовителем ООО «Энерготех» выполнена наплавка износостойкого порошкового сплава ПГ-СРЗ

на торцевые и радиальные поверхности лопастей крыльчатки кавитационного насоса-измельчителя, наиболее подверженные гидроабразивному кавитационному износу в процессе эксплуатации (рисунок 5). Увеличение износостойкости наплавленных покрытий по сравнению с основным материалом лопастей составило 6-8раз.

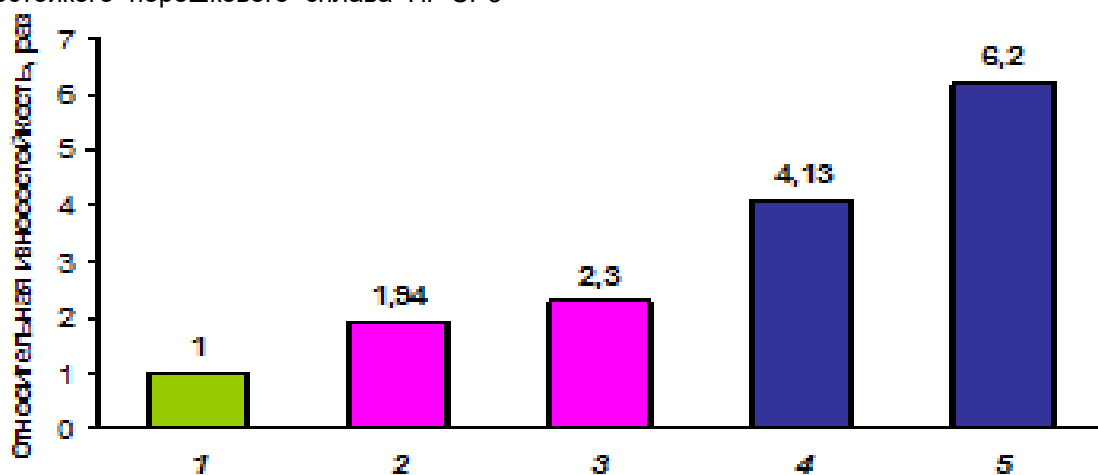


Рисунок 4 – Относительная износостойкость покрытий:
1 – сталь 45 (эталон), 2 – ГП-наплавка (толщина $h=1,5...2,0$ мм), 3 – ГП-наплавка ($h=1,0...1,5$ мм), 4 - СГП-наплавка ($h=1,0...1,5$ мм), 5 - СГП-наплавка ($h=1,5...2,0$ мм)

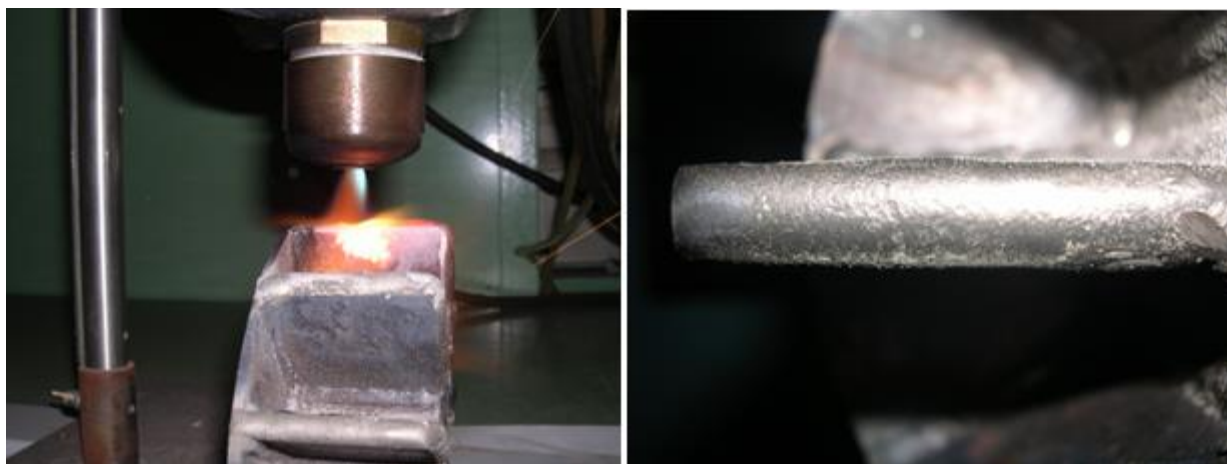


Рисунок 5 – Общий вид крыльчатки насоса-измельчителя: а) в процессе СГП-наплавки защитных износостойких покрытий; б) после СГП-наплавки

Таким образом, в результате сравнительных исследований износостойкости и микроструктуры наплавленных покрытий, установлено, что использование сжатого газопламенного потока с высокой локализацией нагрева, формируемого соплом Лаваля (М5), для наплавки покрытий увеличивает скорость нагрева и последующего охлаждения присадочного металла, снижая тем самым его нахождение в расплавленном состоянии. Это значительно уменьшает размер карбидной фазы в матрице покрытий и снижает частичное растворение твердых частиц и их укрупнение в результате коагуляции. Такие характеристики структуры наплавленных слоев являются предпосылкой для высоких показателей износостойкости покрытий на деталях машин и инструменте [7-11].

Список литературы

- ГОСТ 17367-71 Металлы. Метод испытаний на абразивное изнашивание при трении о закрепленные абразивные частицы.
- Бабич, Б. Н. Металлические порошки и порошковые материалы / Б. Н. Бабич [и др.] - М.: ЭКОМЕТ, 2005. - 520 с.: ил.
- Расчет сопла Лаваля при разработке аппаратуры для сверхзвуковой газопорошковой наплавки/ Радченко М.В., Нагорный Д.А.// Ползуновский вестник, 2008. - №3-С. 346-349.
- Абрамович, Г.И. Прикладная газовая динамика. В 2 ч. Ч.1: учеб. руководство для вузов. - 5-е изд., перераб. и доп.- М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1991. - 600 с.
- Патент на полезную модель № 60410 Россия, МПК В22В 19/06. Устройство для сверхзвуковой газопорошковой наплавки /Радченко М.В., Шевцов Ю.О., Радченко Т.Б., Нагорный Д.А., Маньковский С.А.; заявл. 4.07.2006; опубл. 27.01.2007 в Б.И. № 3.
- Патент № 2346077 Россия, МПК С23С 4/12. Способ сверхзвуковой газопорошковой наплавки защитных покрытий/Радченко М.В., Шевцов Ю.О., Радченко Т.Б., Игнатьев В.В.; заявл. 19.03.2007; опубл. 10.02.2009 в Б.И. № 4.
- Радченко, М.В. Оптическая электронная спектроскопия сверхзвуковых газовых струй в процессе наплавки защитных покрытий/ М.В. Радченко, В.С. Киселев, Ю.О. Шевцов, А.Я. Суранов// Ползуновский вестник, 2009.- №1-2.- С. 279-284.
- Радченко, М.В. Диагностика сверхзвуковых газовых струй в процессах газопорошковой наплавки защитных покрытий/ М.В. Радченко, А.Я. Суранов, Ю.О. Шевцов, В.С. Киселев, В.С. Смолин, С.Г. Уварова// Сварка и диагностика, 2009.- №2.- С. 31-36.
- Радченко М.В., Комплексная диагностика сверхзвуковых газовых струй в процессе газопорошковой наплавки износостойких покрытий/ В.С. Киселев, Ю.О. Шевцов, С.Г. Уварова, Т.Б. Радченко, В.Г. Радченко // Сварка и диагностика, 2011. - №1. - С. 54-58.
- Радченко М.В., Проектирование и технология изготовления модернизированной установки для сверхзвуковой газопорошковой наплавки / Радченко М.В., В.С. Киселев, А.И. Щеткин // Научно-технические технологии в машиностроении, Брянск: изд-во БГТУ, 2016. - № 3. - С. 45-48.

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК УСТРОЙСТВА ДЛЯ СВЕРХЗВУКОВОЙ
ГАЗОПОРОШКОВОЙ НАПЛАВКИ

11. Радченко М.В., Разработка и изготовление устройства для сверхзвуковой газопорошковой наплавки и анализ его технологических характеристик / М.В. Радченко, Д.А. Нагорный, Ю.О. Шевцов, Т.Б. Радченко //Ползуновский вестник. - 2013. - № 4-2. - С. 55-59.
 12. Радченко В.Г., Исследование термоциклов при сверхзвуковой газопорошковой наплавке износостойких покрытий/ В.Г. Радченко, Радченко Т.Б., В.П. Тимошенко, С.Г. Уварова, В.С. Киселёв, Радченко М.В. //Сварка и диагностика, 2011. - №2. – С. 29-32.
 13. Радченко М.В. Комплексные исследования процесса формирования упрочняющих и защитных покрытий.- Автореф. дисс. ... д.т.н. 05.03.01, 05.03.06.- Новосибирск, 1993.- 35 с.
 14. Радченко Т.Б. Комбинированные электро-технологии нанесения защитных покрытий и разработка систем управления их качеством. - Автореф. дисс. ... д.т.н. 05.09.10.- Новосибирск, 2000.- 37 с.
 15. Киселёв В.С. Повышение износостойкости наплавленных покрытий путём выбора рациональных технологических параметров на основе диагностики сверхзвуковых газопорошковых струй.- Автореф. дисс. ...к.т.н. 05.03.06.- Барнаул, 2010.- 21 с.
 16. Радченко М.В., Чередниченко В.С., Радченко Т.Б. Оценка глубины вакуума как критерия управления качеством защитных покрытий //Доклады СО АН Высшей Школы.- Новосибирск: Новосибирское отделение АН ВШ, №2, 2000.- С.61-66.
 17. Шевцов Ю.О. Разработка технологических основ износостойкой электронно-лучевой наплавки в вакууме самофлюсующихся порошковых материалов.-Автореф. дисс. ...к.т.н. 05.03.06.- Барнаул, 1994.- 23 с.
 18. Радченко М.В., Анализ основных технологических параметров комбинированных способов создания защитных покрытий на деталях сельхозмашин/ М.В. Радченко, Т.Б. Радченко, Ю.О. Шевцов, В.Г. Радченко, О.И. Хомутов, С.Г. Уварова, В.С. Киселёв // Ползуновский вестник, 2011.- № 2/2.- С. 244-250.
 19. Радченко М.В., Технологические аспекты управления процессом сверхзвуковой газопорошковой наплавки/ М.В. Радченко, В.С. Киселев, Н.Н. Палаткин, Т.Б. Радченко //Ползуновский вестник. - 2013. - № 4-2. - С. 60-65.
 20. Радченко М.В., Методика прогнозирования качества защитных износостойких покрытий, выполненных способом сверхзвуковой газопорошковой наплавки на объектах Ростехнадзора/ М.В. Радченко, В.С. Киселев, Ю.О. Шевцов, Т.Б. Радченко, В.Г. Радченко, С.Г. Уварова //Сварка и диагностика, 2014. - № 4. - С. 14-18.
 21. Радченко М.В., Киселев В.С., Радченко Т.Б. Прогнозирование процесса плазменно-порошковой наплавки порошка с помощью наноструктурированных сплавов// XVII Конгресс 21-25 мая 2012 года Санкт-Петербург- Электро-технологии . - С.341-344.
 22. Киселев В.С., Технологические аспекты управления процессом сверхзвуковой газопорошковой наплавки/М.В. Радченко, Н.Н. Палаткин, Т.Б. Радченко // Вестник Алтайской науки, 2013. - № 2-2/2013.-С. 227-230.
- Радченко Михаил Васильевич**, *Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, заведующий кафедрой «Малый бизнес в сварочном производстве», mirad_x@mail.ru, +7(3852) 29 07 65, 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46, к. 202Г.*
- Нагорный Дмитрий Анатольевич**, *Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, соискатель кафедры «Малый бизнес в сварочном производстве», mirad_x@mail.ru, +7(3852) 29 07 65, 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46, к. 202Г.*
- Шевцов Юрий Олегович**, *Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, к.т.н., доцент кафедры «Малый бизнес в сварочном производстве», yuoshevtsov@mail.ru, +7(3852) 29 07 65, 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46, к. 202Г.*
- Радченко Татьяна Борисовна**, *Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, д.т.н., профессор кафедры «Малый бизнес в сварочном производстве», mirad_x@mail.ru, +7(3852) 29 07 65, 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46, к. 202Г.*
- Киселев Вадим Сергеевич**, *Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, к.т.н., доцент кафедры «Малый бизнес в сварочном производстве», vadserkis@yandex.ru, +7(3852) 29 07 65, 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46, к. 202Г.*