

На правах рукописи



Киселев Вадим Сергеевич

**ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ НАПЛАВЛЕННЫХ ПОКРЫТИЙ
ПУТЁМ ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
НА ОСНОВЕ ДИАГНОСТИКИ СВЕРХЗВУКОВЫХ ГАЗОПОРОШКОВЫХ СТРУЙ**

Специальность 05.02.10 -
Сварка, родственные процессы и технологии

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Барнаул – 2010

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Радченко Михаил Васильевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Смирнов Александр Николаевич

кандидат технических наук, доцент
Тимошенко Владимир Петрович

Ведущее предприятие: ОАО «АНИТИМ» (г. Барнаул)

Защита состоится 19 марта 2010 г. в 10.00 на заседании диссертационного совета Д 212.004.01 при ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» по адресу: 656038, Барнаул, пр. Ленина, 46; факс: 8-(3852)-367-903, e-mail: yuoshevtsov@mail.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова».

Автореферат разослан « 19 » марта 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



Ю.О. Шевцов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Высокие механические и тепловые нагрузки, воздействие различных агрессивных сред на детали, сопровождающие работу технологического оборудования вызывают износ и повышенный риск возникновения аварий и техногенных катастроф в машиностроении и энергетике. Важнейший показатель надежности и долговечности оборудования - состояние поверхностного слоя его деталей, так как разрушение конструкционного материала начинается с его поверхности. Образование различных дефектов на поверхности изделия вследствие абразивного износа, воздействия активных сред и т.д. приводит к потере необходимых качественных характеристик деталей оборудования.

В мире большое распространение получил процесс напыления защитных покрытий сверхзвуковыми газовыми струями. В этом процессе используются напылительные порошки фракцией до 10 мкм, производимые исключительно за рубежом. Однако, как известно, все процессы напыления имеют существенный недостаток, ограничивающий их промышленное применение – вероятность отслоения покрытия из-за его относительно низкой прочности сцепления с основой.

Кардинально решить эту проблему возможно с помощью замены напылительных процессов наплавкой износостойких материалов, в частности новым эффективным процессом – сверхзвуковой газопорошковой наплавкой (СПП-наплавкой). Отличительной технологической особенностью СПП-наплавки является более высокая концентрация энергии газопламенного источника нагрева при увеличении скорости истечения газовых потоков на срезе сопла газопламенной установки. При этом влияние характеристик самого пламени на свойства наплавляемого защитного покрытия является очевидным.

Характерным для СПП-наплавки сплавов на основе никель-хром-бор-кремний фракции 40...100 мкм является образование наплавленного защитного покрытия со структурой, представляющей Ni-матрицу с равномерно распределенными раздробленными карбидами. Это позволяет увеличить износостойкость поверхностей оборудования в 8...12 раз.

В процессах сверхзвуковой газопорошковой наплавки главным технологическим инструментом получения покрытия является сверхзвуковая газопорошковая струя – сверхзвуковой поток горячей газовой смеси с летящими частицами порошкового сплава ПГ-СРЗ. На данный момент физические процессы горения различных топлив и горючих смесей достаточно изучены, однако мало внимания уделяется изучению физических процессов, происходящих в газопорошковых струях в технологических процессах нанесения защитных покрытий.

Выявление законов формирования защитного покрытия и коэффициентов влияния технологических и физических параметров газопорошковой струи в процессе СПП-наплавки на эксплуатационные свойства наплавленного покрытия позволит получать покрытие с заранее прогнозируемыми свойствами при обеспечении рационального диапазона режимов процесса.

Ввиду новизны и сложности процесса газопорошковой наплавки её технологические параметры практически не изучены. При этом, как показали предварительные исследования, основными технологическими параметрами являются: распределение температуры в факеле пламени и распределение порошковых частиц в пролетном пространстве сверхзвукового газопламенного потока. В этой связи актуальной является проблема обоснованного выбора диапазонов технологических параметров сверхзвуковой газопорошковой струи, при которых обеспечиваются наилучшие качественные характеристики наплавляемого покрытия.

Цель работы. Повышение износостойкости наплавленных покрытий, выполненных способом сверхзвуковой газопорошковой наплавки путём выбора рациональных технологических параметров на основе диагностики сверхзвуковых газопорошковых струй.

Для достижения сформулированной цели работы решались следующие научные и прикладные задачи:

1. Выявить основные критерии качества и технологические параметры сверхзвуковой газопорошковой струи, наиболее сильно влияющие на износостойкость наплавляемых покрытий.

2. Провести анализ и обоснованный выбор методов исследования основных параметров сверхзвуковых газопорошковых струй.

3. Разработать комплексную методику диагностики параметров сверхзвуковой газопорошковой струи.

4. Установить зависимость структуры и износостойкости защитных покрытий от основных диагностируемых параметров сверхзвукового газопорошкового потока и определить рациональные режимы процесса наплавки.

Методы исследований. Для исследования сверхзвуковых газопорошковых струй и наплавленных ими покрытий в работе были применены стандартные и оригинальные методы: ротаметрия, оптическая пирометрия, эмиссионная оптическая спектроскопия, высокоскоростная фотосъемка, световая микроскопия, рентгеноструктурный анализ покрытий, дюрометрия и метод испытания на абразивное изнашивание при трении о закрепленные абразивные частицы (ГОСТ 17367-71), а также программные продукты LabVIEW 7.1, Origin 8.0, «Прогноз-техно».

Получение достоверных результатов достигалось использованием современного технологического оборудования, серийных и опытных приборов, компьютерной техники, стандартных методов экспериментальных и теоретических исследований, а также необходимым количеством повторений опытов.

Научная новизна работы:

1. Выявлены основные технологические параметры процесса сверхзвуковой газопорошковой наплавки порошковых сплавов системы Ni-Cr-B-Si фракцией 40...100 мкм (общий расход Q , соотношение рабочих газов β и рабочее расстояние L) и критерии качества газопорошковых струй (длина факела пламени l , температура пламени T , плотность газопорошкового потока ρ), в наибольшей

степени влияющие на структурные характеристики и износостойкость наплавляемых покрытий.

2. Определены закономерности распределения интенсивности излучения молекул C_2 (полос Свана) и атомов углерода С в зависимости от режимов сверхзвукового горения газовой смеси и газопорошковой наплавки по длине пламени. Установлена зависимость интенсивности излучения от расхода Q и соотношения β рабочих газов (кислород/пропан) и рабочего расстояния от среза сопла до наплавляемого изделия. На основании этого определен рациональный диапазон значений рабочих расстояний $L=20\ldots 30$ мм от среза сопла и соотношений рабочих газов $\beta=1,1\ldots 1,3$ для формирования качественных защитных покрытий.

3. Установлено, что покрытия, наплавленные порошковыми сплавами системы Ni-Cr-B-Si на рекомендованных диагностированных технологических режимах характеризуются мелкой карбидонасыщенной структурой на основе γ -фазы, отвечающей требованиям износостойкости, в отличие от дендритной структуры покрытий, наплавленных на нерациональных режимах.

Практическая значимость работы.

1. Разработан комплексный алгоритм диагностики сверхзвуковых газопорошковых струй, позволяющий выявить рациональные технологические режимы процесса износостойкой наплавки.

2. Выявлены рациональные технологические режимы СГП-наплавки, позволяющие наносить защитные покрытия на основе порошковых сплавов системы Ni-Cr-B-Si фракцией 40...100 мкм на быстроизнашиваемых деталях кавитационного оборудования.

3. Полученные результаты работы апробированы в процессе газопорошковой наплавки износостойких покрытий на изнашиваемые поверхности лопастей крыльчатки кавитационного насоса-измельчителя и переданы для внедрения в ООО «Энерготех» (г. Барнаул). Расчетный экономический эффект от внедрения разработанной технологии на одной крыльчатке составляет 16 тыс. рублей на один насос в год.

Вклад автора состоит в анализе научной и технической литературы по исследуемой теме, постановке задачи исследования, выборе и разработке методик исследования, обработке полученных экспериментальных данных, формулировании основных выводов по работе.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на региональных, всероссийских и международных конференциях:

3-й Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь». – г. Барнаул, 2006, 2009 г.; Всероссийской конференции по приоритетному направлению программы «Энергетика и энергосбережение». – г. Томск, 2006 г.; The Thirteenth International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists «Modern Techniques and Technologies». – Tomsk, 2007; IX Городской научно-практической конференции молодых ученых «Молодежь-Барнаулу». – г. Барнаул, 2008 г.; The Third International Forum on Strategic Technologies (IFOST-2008). – г. Новосибирск,

2008. Результаты диссертационного исследования выносились на обсуждение на объединённых научно-технических семинарах кафедр «Малый бизнес и сварочное производство» и «Автоматизированный электропривод и электротехнологии» АлтГТУ им. И.И.Ползунова.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 работ, в том числе **1 публикация в журнале из списка, рекомендованного ВАК**, публикации в сборниках докладов на международных и региональных конференциях.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов по работе, списка использованной литературы и приложений. Диссертация изложена на 129 страницах, в том числе содержит 74 рисунка, 30 таблиц, список литературы из 75 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведена актуальность, обозначены цель и задачи исследования, представлены методы исследований, научная новизна и практическая значимость результатов диссертационной работы.

В первой главе представлен анализ способов нанесения защитных покрытий, описаны достоинства и недостатки каждого способа, обоснована необходимость модернизации способа газопорошковой наплавки и использования в данном процессе сверхзвуковых газовых струй. Описаны принципы получения сверхзвуковых газовых струй и приведено описание некоторых серийно выпускаемых установок для сверхзвукового газопорошкового напыления. Показана необходимость применения наплавочных процессов для защиты деталей технологического оборудования, подверженных в ходе эксплуатации интенсивному износу.

Для борьбы с интенсивным изнашиванием деталей технологического оборудования в работе предлагается наносить защитное покрытие принципиально новым методом – сверхзвуковой газопорошковой наплавкой с использованием системы контроля и диагностики параметров данного процесса.

Во второй главе приведены основные методики исследования характеристик газопорошковых струй при нанесении защитных покрытий, описаны основные узлы и приборы, обеспечивающие повторяемость и стабильность процессов газотермического нанесения защитных покрытий.

Для обеспечения получения достоверных повторяющихся данных был изготовлен ротаметрический стенд контроля за расходом рабочих газов – пропана и кислорода, и транспортирующего газа для подачи порошкового сплава – сжатого воздуха. Расход кислорода и пропана измерялся при помощи соответственно ротаметров РМ4-2,5ГУЗ и РМ-0,4ГУЗ, сжатого воздуха – ротаметра РМ-0,4ГУЗ. При помощи указанных в технической документации формул был произведен перерасчет показаний ротаметров на рабочие давления и плотности газов.

Алгоритм комплексных исследований процесса сверхзвуковой газопорошковой наплавки Ni-Cr-B-Si сплавов показан на рисунке 1.

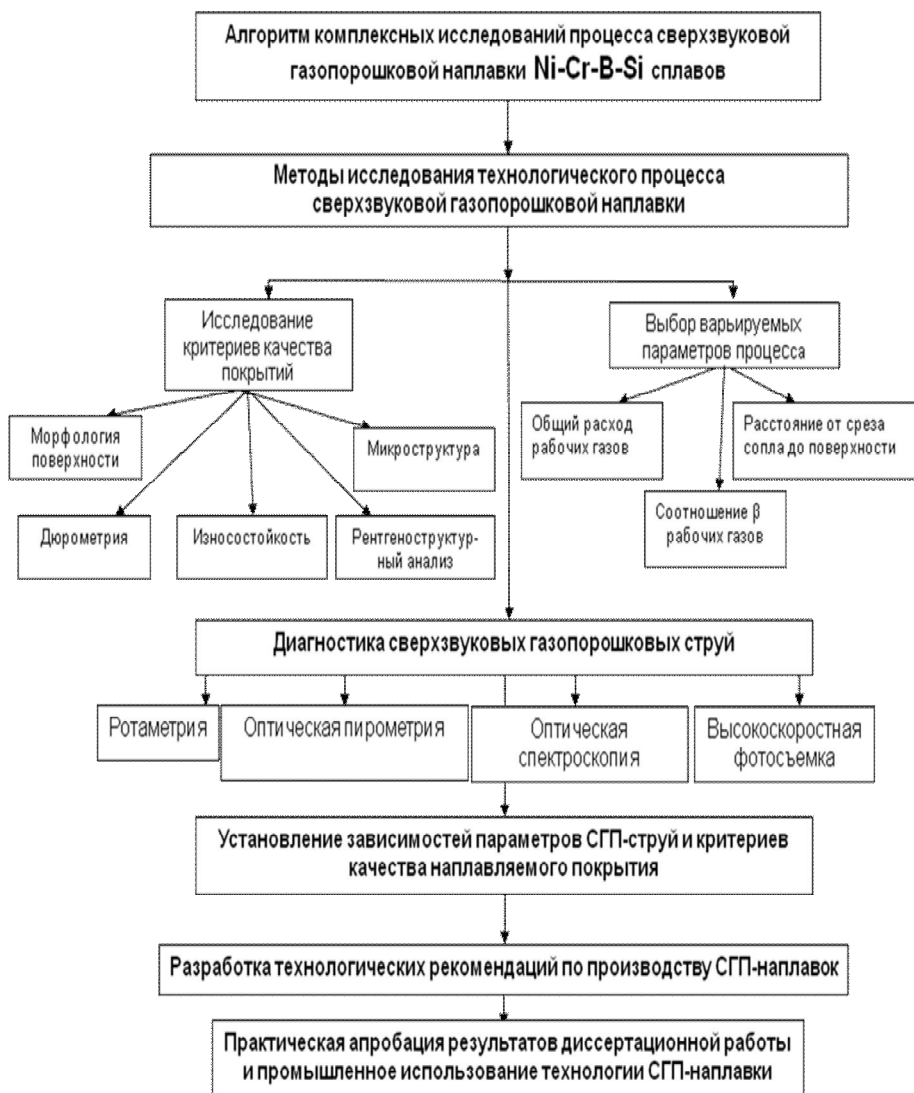


Рисунок 1 – Алгоритм комплексных исследований процесса сверхзвуковой газопорошковой наплавки

Структурная схема экспериментальной установки регистрации спектра сверхзвуковой газопорошковой струи показаны на рисунке 2.

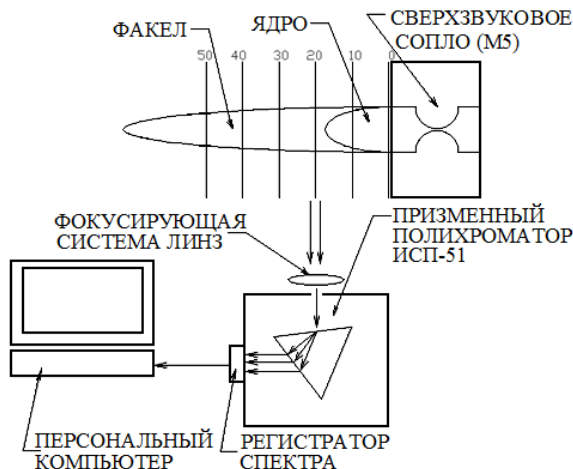
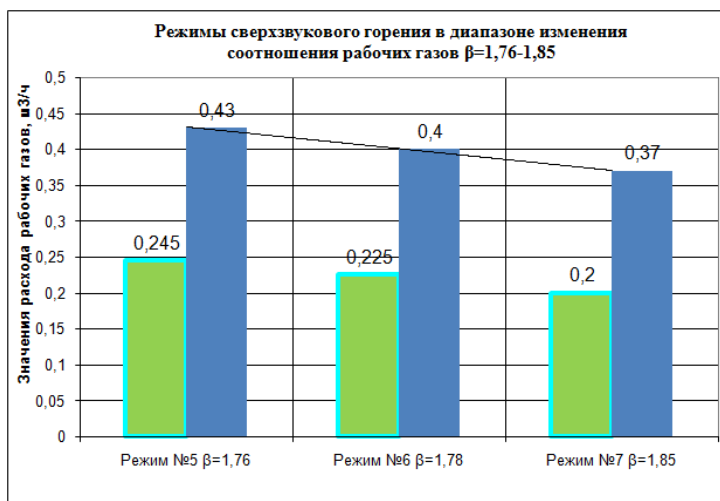
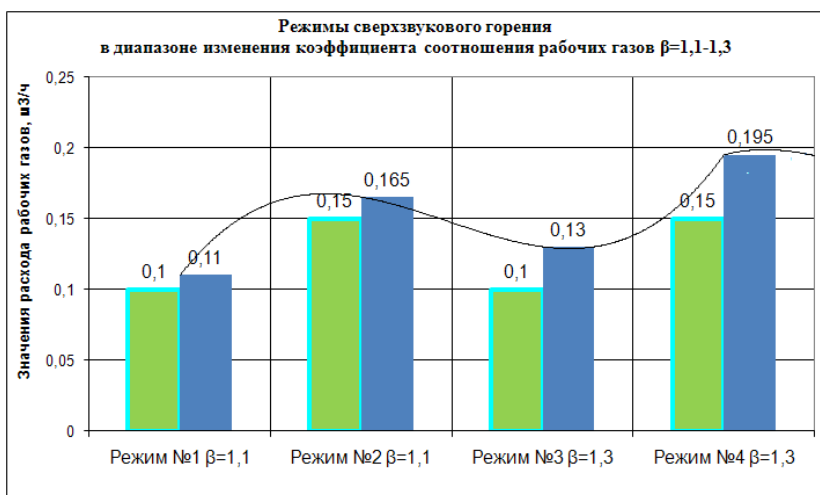


Рисунок 2 – Структурная схема экспериментальной установки регистрации спектра сверхзвуковой газопорошковой струи

В третьей главе представлены результаты проведенных экспериментальных исследований распределения температурных характеристик газопорошкового потока в зависимости от расстояния от края сопла и расхода и соотношения рабочих газов.

С целью уточнения некоторых технико-экономических характеристик на установке для сверхзвуковой газопорошковой наплавки с соплом, имеющим параметр - число Маха М5, были произведены эксперименты по наплавке образцов защитных покрытий на семи технологических режимах (рисунок 3).

Уже первичный анализ экспериментальных данных по определению диапазона расхода рабочих газов при дозвуковой и сверхзвуковой наплавке позволил сделать вывод о том, что оборудование для сверхзвуковой газопорошковой наплавки определяет более рациональные характеристики процесса, такие как расход рабочих газов (пропана $Q_{\text{пр}}$ и кислорода Q_K), который за счет более концентрированного пятна нагрева составляет $Q_{\text{пр}} = 0,078 \dots 0,24 \text{ м}^3 / \text{ч}$ $Q_K = 0,09 \dots 0,27 \text{ м}^3 / \text{ч}$ по сравнению с дозвуковой наплавкой горелкой ГН-5П, где диапазон расхода рабочих газов составляет для многосоплового наконечника - $Q_{\text{пр}} = 0,252 \dots 0,51 \text{ м}^3 / \text{ч}$ $Q_K = 0,319 \dots 0,715 \text{ м}^3 / \text{ч}$, для односуплового - $Q_{\text{пр}} = 0,16 \dots 0,338 \text{ м}^3 / \text{ч}$, $Q_K = 0,255 \dots 0,613 \text{ м}^3 / \text{ч}$. Таким образом, модернизация газопламенного оборудования с использованием сверхзвукового сопла позволяет сократить расход рабочих газов в 2...3 раза по сравнению с оборудованием для дозвуковой наплавки. Поэтому дальнейшие исследования были выполнены для процесса сверхзвуковой газопорошковой износостойкой наплавки.



Пропан
 Кислород

Рисунок 3 – Гистограмма режимов наплавки

Исследования спектра излучения сверхзвуковой газовой струи проводились в режимах сверхзвукового горения и наплавки при различных технологических режимах. Режимы №1-4 позволяют производить наплавку защитного покрытия порошкового сплава ПГ-СРЗ. При этом общий расход рабочих газов и коэффициент их соотношения $\beta=1,1...1,3$ обеспечивают получение защитного покрытия с

заданными качественными характеристиками Режимы №5-7 обеспечивают наиболее устойчивый процесс сверхзвукового горения со стабильными геометрическими размерами и четкими границами факела струи, однако из-за высокого коэффициента $\beta=1,76...1,85$ данные режимы не позволяют производить наплавку защитного покрытия, так как приводят к интенсивному окислению подложки при нагреве и несплавлению порошка с основой.

Наиболее характерные спектрограммы сверхзвукового горения показаны на рисунке 4 для режима №5 с общим расходом $Q_{\text{общ}}=0,675 \text{ м}^3/\text{ч}$ и соотношением рабочих газов кислород-пропан $\beta=1,85$.

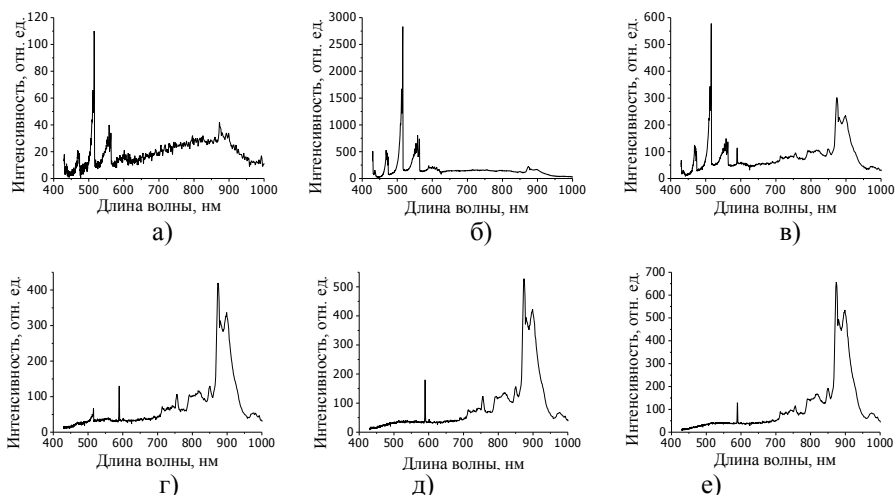


Рисунок 4 – Спектры сверхзвуковой струи на расстоянии от среза сопла:
а) 0 мм; б) 10 мм; в) 20 мм; г) 30 мм; д) 40 мм; е) 50 мм

При анализе результатов экспериментов использовались фотографии спектров излучения молекул. Были четко идентифицированы полосы спектра ядра сверхзвукового пламени: обнаружены полосы молекул C_2 (полосы Свана), соответствующие длинам волн – 438,3 нм, 473,7 нм, 516,5 нм, 563,6 нм и 619,1 нм. Из литературы известно, что появление радикала C_2 наблюдается вблизи зоны максимальной температуры. Таким образом, установлено, что температура пламени максимальна в области, где наблюдается наиболее интенсивное излучение полос Свана.

Необходимо отметить, что непосредственно в факеле сверхзвуковой струи данные полосы исчезали, при этом появлялись характерные спектры ярко светящихся частиц углерода (атомов C) в диапазоне 750...950 нм, расчет содержания которых является актуальной задачей при отработке технологических режимов сверхзвуковой газопорошковой наплавки. Так как при нагреве защищаемой детали науглероживающим пламенем определенная доля углерода пламени поглощается поверхностью, позволяя снизить температуру плавления

тончайшего поверхностного слоя, содержание углерода в пламени напрямую влияет на образование жидкой металлической ванны в поверхностных слоях детали.

Полученные данные об интенсивности полос в спектре ядра сверхзвукового пламени позволяют судить об относительном изменении фазового состава сверхзвуковой струи и температуры пламени в зависимости от расстояния от среза сопла и соотношения рабочих газов. Относительное изменение температуры и фазового состава газовой смеси в зависимости от расстояния от среза сопла представлено на рисунке 4. На рисунке 4, а показан спектр излучения ядра пламени на краю сопла: четко видны полосы молекул C_2 , имеющие интенсивность излучения 20 отн. ед. на длине волны 473,7 нм, 107 отн. ед. на длине волны 516,5 нм, 40 отн. ед. на длине волны 563,6 нм и 18 отн. ед. на длине волны 619,1 нм. Далее, на расстоянии 10 мм от среза сопла (рисунок 4, б) наблюдается резкое увеличение интенсивности излучения данных линий, которое составляет соответственно 500, 2833, 750 и 200 отн. ед. – зона максимальной температуры. При этом в спектре сверхзвуковой струи появляются полосы ярко светящихся частиц углерода интенсивностью 223 отн. ед. Далее, на расстоянии 20 мм от среза сопла (рисунок 4, в) наблюдается уменьшение интенсивности излучения линий молекул C_2 , которое теперь составляет соответственно 120, 578, 150 и 55 отн. ед. При этом интенсивность полос частиц углерода увеличивается до 302 отн. ед. С дальнейшим увеличением расстояния до 30, 40, 50 мм (рисунок 4, г, д, е) наблюдается исчезновение полос исходных составляющих пламени (молекул C_2), а интенсивность излучения частиц углерода составляет для этих расстояний соответственно 420, 528, 657 отн. ед., что свидетельствует о незначительном увеличении количества частиц углерода в газовой смеси.

При производстве наплавки одним из наиболее характерных является режим №2, со значениями расхода пропана $Q_{пр} = 0,15 \text{ м}^3/\text{ч}$ и кислорода $Q_K = 0,165 \text{ м}^3/\text{ч}$, коэффициентом соотношения рабочих газов $\beta = 1,1$. Графики изменения спектра сверхзвуковой струи без подачи порошка приведены на рисунке 5.

На графиках отображаются пики интенсивностей – пик излучения натрия на длине волны 589,6 нм и пик изотопа кислорода 754,2 нм – 757,2 нм.

При этом при удалении от среза сопла в режиме без подачи порошка интенсивность излучения натрия составляет 4 отн.ед. на краю сопла, 35 отн.ед. на расстоянии 10 мм от среза сопла, 17 отн.ед. на расстоянии 20 мм, 23 отн.ед. при расстоянии 30 мм, 33 отн.ед. на расстоянии 40 мм, 4 отн.ед. на расстоянии 50 мм. Интенсивность излучения изотопа кислорода на краю сопла составляет 15 отн.ед., на расстоянии 10 мм - 30 отн.ед., на расстоянии 20 мм - 25 отн.ед., на расстоянии 30 мм - 21 отн.ед., на расстоянии 40 мм - 19 отн.ед., на расстоянии 50 мм - 12 отн.ед. Излучение атомарного углерода на краю сопла составляет 143 отн.ед., далее интенсивность излучения на расстоянии 10 мм - 169 отн.ед., на расстоянии 20 мм - 198 отн.ед., на расстоянии 30 мм - 210 отн.ед., на расстоянии 40 мм - 191 отн.ед., на расстоянии 50 мм - 175 отн.ед.

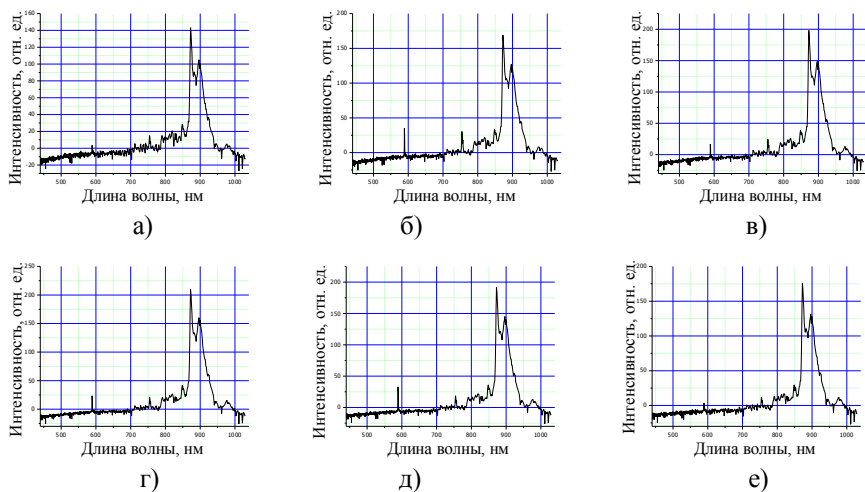


Рисунок 5 – Спектры сверхзвуковой струи на расстоянии от среза сопла:
а) 0 мм; б) 10 мм; в) 20 мм; г) 30 мм; д) 40 мм; е) 50 мм

Графики изменения спектра сверхзвуковой струи с подачей порошка приведены на рисунке 6.

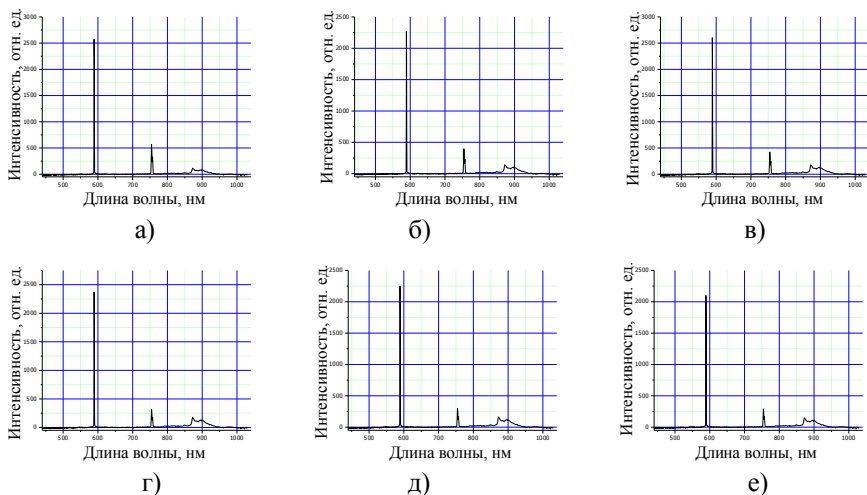


Рисунок 6 – Спектры сверхзвуковой струи на расстоянии от среза сопла:
а) 0 мм; б) 10 мм; в) 20 мм; г) 30 мм; д) 40 мм; е) 50 мм

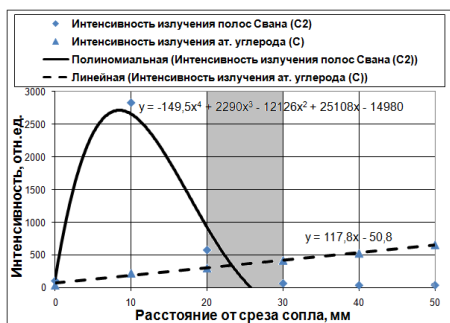
На графиках отображаются пики интенсивностей – пик излучения натрия на длине волны 589,6 нм и пик изотопа кислорода 754,2 нм – 757,2 нм. При подаче

порошкового материала также наблюдается резкое увеличение интенсивности излучения данных полос, что говорит о том, что при подаче порошка в сверхзвуковой газопорошковой струе происходит изменение условий возбуждения.

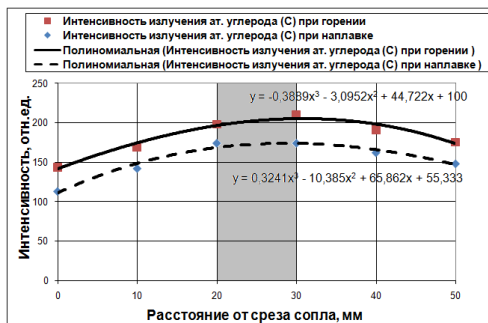
При этом при удалении от среза сопла в режиме с подачей порошка интенсивность излучения натрия составляет 2576 отн.ед. на краю сопла, 2276 отн.ед. на расстоянии 10 мм от среза сопла, 2606 отн.ед. на расстоянии 20 мм, 2377 отн.ед. при расстоянии 30 мм, 2251 отн.ед. на расстоянии 40 мм, 2100 отн.ед. на расстоянии 50 мм. Интенсивность излучения изотопа кислорода на краю сопла составляет 569 отн.ед., на расстоянии 10 мм - 400 отн.ед., на расстоянии 20 мм - 426 отн.ед., на расстоянии 30 мм - 317 отн.ед., на расстоянии 40 мм - 301 отн.ед., на расстоянии 50 мм - 294 отн.ед. Излучение атомарного углерода на краю сопла составляет 113 отн.ед., далее интенсивность излучения на расстоянии 10 мм - 142 отн.ед., на расстоянии 20 мм - 174 отн.ед., на расстоянии 30 мм - 174 отн.ед., на расстоянии 40 мм - 162 отн.ед., на расстоянии 50 мм - 148 отн.ед.

Расстояние от среза сопла 10...30 мм является зоной пересечения линий интенсивности молекулярного и атомарного углерода (рисунок 7, а). Таким образом, данное расстояние представляет наибольший интерес с технологической точки зрения. Как показали технологические эксперименты, использование режима №5 с $\beta = 1,76$ не дает возможности реализовать процесс наплавки защитного покрытия. Это объясняется появлением окисной пленки на поверхности металла подложки, что крайне затрудняет адгезию наплавляемого материала с защищаемой поверхностью. Поэтому дальнейшие исследования спектральных характеристик газовых струй выполнялись при $\beta < 1,5$. Согласно рисунка 7, б) пики интенсивностей излучения атомарного углерода С при режиме №2 фиксируются на расстоянии $L=30$ мм от среза сопла. Обобщая результаты спектрального анализа можно сделать вывод, что расстояние $L=20...30$ мм от среза сопла в исследуемом диапазоне режимов является наиболее технологически рациональным для создания защитных покрытий способом СГП-наплавки.

Фотографические исследования сверхзвуковой газопорошковой струи проведены для режима сверхзвуковой газопорошковой наплавки №2 (расходом пропана $Q_{пр} = 0,15 \text{ м}^3/\text{ч}$ и расходом кислорода $Q_K = 0,165 \text{ м}^3/\text{ч}$), коэффициент соотношения рабочих газов составлял $\beta = 1,1$. Данное соотношение является наиболее технически целесообразным для процессов сверхзвуковой газопорошковой наплавки, так как позволяет получить требуемую температуру нагрева при сохранении качественных характеристик самой струи.



а)

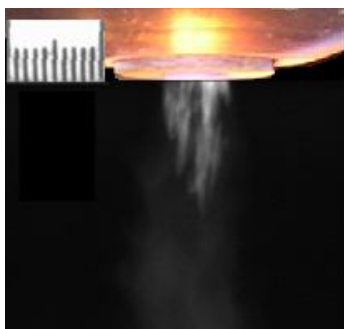


б)

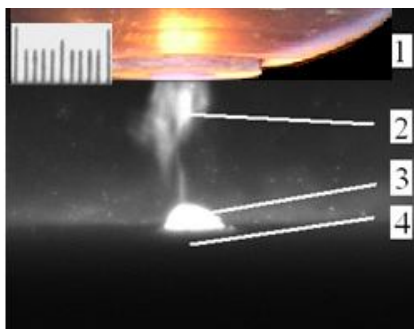
Рисунок 7 – Зависимости интенсивности излучения: а) молекулярного (полос Свана C2) и атомарного углерода (C) в сверхзвуковой газовой струе от расстояния L от среза сопла (режим №5); б) атомарного углерода C в сверхзвуковой газовой струе от рабочего расстояния от среза сопла при горении и наплавке (режим №2)

Также следует отметить, что в результате проведения экспериментов по изучению сверхзвуковой струи в процессах газопорошковой наплавки было установлено, что по ранее определенным критериям качества режим наплавки №2 является наиболее рациональным для нанесения защитного покрытия.

На фотографиях высокоскоростной съемки (рисунок 8) было получено изображение ядра и факела пламени с подачей и без подачи порошкового сплава ПГ-СРЗ, а также времяпролетные треки наплавляемых частиц.



а)



б)

Рисунок 8 – Изображение сверхзвукового газового пламени: а) без подложки и частиц порошкового сплава ПГ-СРЗ; б) в процессе наплавки на подложку с потоком частиц порошкового сплава ПГ-СРЗ; где 1 – сверхзвуковое сопло, 2 – ядро пламени, 3 – наплавленный материал защитного покрытия; 4 – подложка

На рисунке 8 наблюдается ядро пламени и поток частиц порошкового сплава ПГ-СРЗ, формирующих наплавляемое защитное покрытие. В процессе наплавки порошковый материал образует на поверхности детали небольшую «каплю» защитного покрытия, формирующую при последовательном перемещении горелки наплавленный валик.

Высокоскоростная фотосъемка позволила установить, что факел сверхзвуковой газопорошковой струи представляет собой турбулентный поток горячей смеси рабочих газов с летящими частицами порошкового сплава ПГ-СРЗ (рисунок 9).



Рисунок 9 – Турбулентный сверхзвуковой газопорошковый поток

Из рисунка 9 следует, что сверхзвуковой газопорошковый поток, получаемый на сверхзвуковом сопле с числом Маха M_5 , также как и дозвуковой поток, имеет турбулентную природу – представляет из себя хаотическое движение газа с беспорядочным движением частиц по сложным траекториям и почти постоянной по сечению скоростью потока. Ввиду такой природы горения все характеристики как газопламенной струи так и летящего порошка носят хаотичный случайный характер, что усложняет поиск рациональных значений параметров наплавки.

Однако совокупность исследований позволяет сделать вывод о том, что существуют определенные закономерности в изменении характеристик газовой и газопорошковой струи в измеряемом диапазоне изменения общего расхода рабочих газов и коэффициента их соотношения β . Так установлено, что максимальная температура сверхзвукового газового пламени сосредоточена на краю ядра (на расстоянии 10...20 мм в зависимости от режима). При этом в газопорошковой струе начиная с расстояния порядка 30 мм от среза сопла наблюдается явление расфокусирования потока (разлет порошкового сплава ПГ-СРЗ), что ведет к уменьшению плотности порошкового потока ρ , определяющего стабильность формирования защитных покрытий. Это в свою очередь приводит к уменьшению скорости частиц, понижению их температуры и смещению от оси газопорошкового потока.

В четвёртой главе приведены экспериментально полученные данные по микроструктуре, фазовому составу, микротвердости и износостойкости защитных покрытий, наплавленных при различных технологических режимах СГП-наплавки.

Анализ фазового состава и микроструктур защитных покрытий, наплавленных на нерациональном технологическом режиме (коэффициент $\beta > 1,5$) и рациональном (коэффициент $\beta = 1,1$) показал следующее.

В обоих технологических вариантах наплавки порошковых самофлюсующихся сплавов системы Ni-Cr-B-Si, где никеля – порядка 70%, основой наплавленных покрытий является γ -фаза на основе никеля. Граница сплавления покрытий с защищаемым металлом достаточно ровная, что является одним из положительных показателей технологического процесса наплавки (рисунок 10).

Однако, как видно на фотографиях, при наплавке на режимах, характеризующихся как нерациональные, покрытия имеют дендритную структуру, которая по своему строению не может обеспечить равномерную твердость и высокие показатели износостойкости. В отличие от первого режима, рациональные режимы позволяют стабильно формировать структуру с карбидами типа Fe_3C , Cr_7C_3 и Cr_7C_3 , представляющими частицы преимущественно глобулярной формы, достаточно равномерно распределённые в никелевой матрице. Как известно, такое строение металла отвечает требованиям получения наиболее высоких показателей износостойкости при большинстве видов механического изнашивания, что было подтверждено в результате дальнейших исследований.

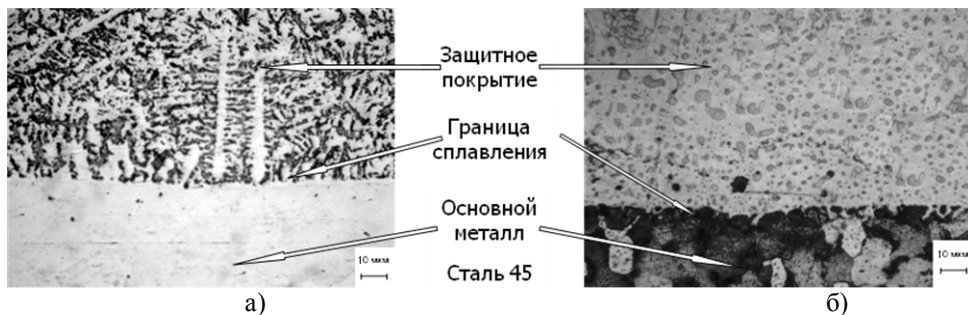


Рисунок 10 – Фотографии микроструктур образцов защитных покрытий, наплавленных сплавом ПГ-СРЗ на: а) нерациональном; б) рациональном технологическом режиме

Замеры микротвердости покрытий, выполненные в 2-х сечениях, подтвердили выводы о том, что в дендритной структуре значения микротвёрдости нестабильны и по абсолютным показателям находятся в пределах 200...400 МПа. Рациональные режимы наплавки, обеспечившие формирование карбидонасыщенной структуры имеют примерно в 2 раза более высокие показатели микротвёрдости. Но что более важно, что эти показатели существенно более стабильны по всей толщине покрытия, что является критерием более высокой износостойкости при большинстве видов механического изнашивания.

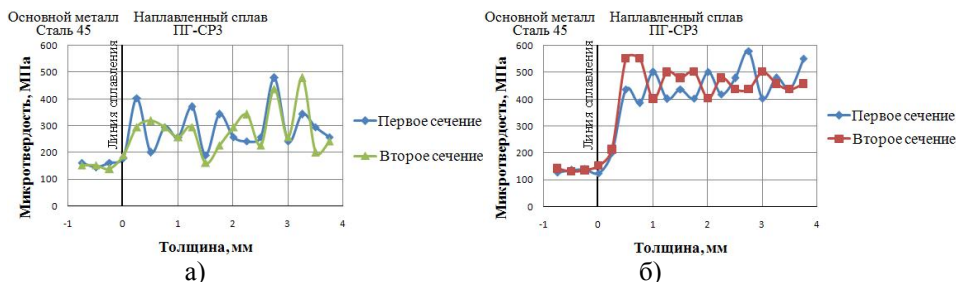


Рисунок 11– Распределение значений микротвердости защитных покрытий, наплавленных на: а) нерациональным; б) рациональным технологическом режиме

Исследование износостойкости материала наплавленных покрытий проводились по методу испытания на абразивное изнашивание при трении о закрепленные абразивные частицы (ГОСТ 17367-71).

На основании экспериментальных данных были построены зависимости износостойкости (по относительной потере массы) от основных параметров сверхзвукового газопорошкового потока: коэффициента β соотношения рабочих газов и рабочего расстояния от среза сопла при наплавке. Результаты испытаний приведены на рисунке 12.

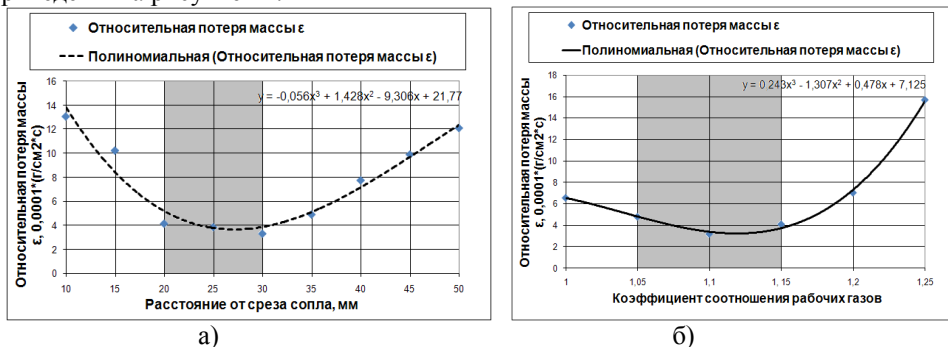


Рисунок 12 – Результаты испытаний на износостойкость покрытий, наплавленных на различных расстояниях от среза сопла (10-50 мм)

Как видно из рисунка 12, наиболее высокую износостойкость имеют покрытия, наплавленные при расстоянии от среза сопла до поверхности порядка 20...30 мм и коэффициенте $\beta = 1,05...1,15$.

Таким образом, результаты исследований структуры и физико-механических свойств наплавленных покрытий подтверждают правильность выбора технологических параметров СГП-наплавки на основе разработанной комплексной методики диагностики сверхзвуковых газопорошковых струй.

Результаты исследования технологии сверхзвуковой газопорошковой наплавки с использованием комплексной диагностики были апробированы на ООО

«Энерготех».

В качестве наплавляемой детали была выбрана крыльчатка насоса-измельчителя, наиболее подверженная кавитационному износу в процессе эксплуатации.

По техническому заданию необходимо было наплавить порошковый сплав ПГ-СРЗ на торцевые и радиальные поверхности лопастей крыльчатки. На рисунке 13 представлены фотографии крыльчатки насоса до и в процессе нанесения защитного покрытия методом СГП-наплавки.

Наплавка всех плоскостей крыльчатки выполнялась в нижнем положении.

Согласно проведенным исследованиям увеличение износостойкости наплавленных покрытий составит 8...10 раз по сравнению со сталью 45.

Межремонтный период кавитационных насосов с незащищенными поверхностями крыльчатки составляет 6 месяцев. Стоимость замены крыльчатки на одном насосе составляет 8 тыс. рублей. Расчетный экономический эффект от внедрения разработанной технологии на одной крыльчатке составляет 16 тыс. рублей на один насос в год.

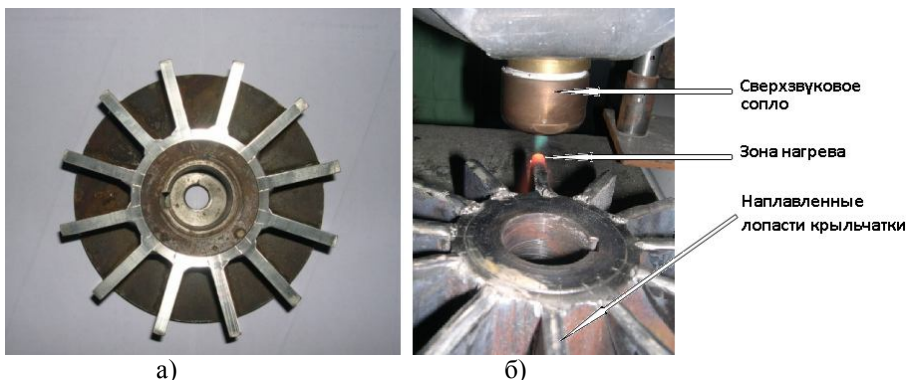


Рисунок 13 – Фотографии крыльчатки насоса: а) до нанесения защитного покрытия; б) в процессе нанесения защитного покрытия

Результаты и выводы.

1. В результате комплексного анализа сверхзвуковых газовых струй в режимах горения и газопорошковой наплавки установлены основные технологические параметры, определяющие качество наплавляемых износостойких покрытий. К ним относятся температура газовой струи, общий расход Q и коэффициент соотношения рабочих газов β , а также расстояние L от среза сопла до поверхности.

2. Методом скоростной фотосъемки установлено, что на расстоянии от 0 до 30 мм от среза сопла плотность порошкового потока ρ – основного параметра, определяющего стабильность формирования защитных покрытий, максимальна.

3. Разработаны научно-обоснованные технологические рекомендации для процесса сверхзвуковой газопорошковой износостойкой наплавки: наплавляемый материал – порошковый сплав системы Ni-Cr-B-Si марки ПГ-СРЗ, диапазон давлений рабочих газов - пропан: 1,0...3,0 атм, кислород: 4,5...5,0 атм; расход рабочих газов - пропан: 1,5...5,0 л/мин, кислород: 1,9...6,5 л/мин; коэффициент соотношения рабочих газов $\beta=1,1...1,3$; рабочее расстояние от среза сопла до наплавляемого изделия $L=20...30$ мм.

4. Результаты исследования структуры и свойств покрытий, наплавленных на рекомендованных режимах, качественно подтвердили результаты комплексной диагностики сверхзвуковых газовых струй: износостойкость таких покрытий в 8...10 раз выше показателей стали 45.

5. Выполнена апробация диагностированного технологического процесса сверхзвуковой газопорошковой наплавки износостойких покрытий на предприятии ООО «Энерготех» (г. Барнаул) с расчётным экономическим эффектом 16 000 рублей в год на одном изделии.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Оптическая эмиссионная спектроскопия сверхзвуковых газовых струй в процессе наплавки защитных покрытий. Радченко М.В., Киселев В.С., и др./ Ползуновский вестник № 1-2 / АлтГТУ им. И.И.Ползунова. – Барнаул: изд-во АлтГТУ, 2009. – С. 279-284. **(Из списка, рекомендованного ВАК РФ).**

2. Предпосылки создания автоматизированной установки газопламенного нанесения защитных покрытий на поверхности труб котлов с кипящим слоем. Радченко М.В., Головачев А.М., Киселев В.С./ 3-я Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Наука и молодежь". Секция «Энергетика». Подсекция «Автоматизированный электропривод и электротехнологии» / АлтГТУ им. И.И.Ползунова. – Барнаул: изд-во АлтГТУ, 2006. – С. 11-12.

3. Спектральная диагностика сверхзвуковых газовых струй в процессах газопорошковой наплавки защитных покрытий. Радченко М.В., Киселев В.С., Шевцов Ю.О., Суранов А.Я. и др. / Ползуновский альманах №3/ АлтГТУ им. И.И.Ползунова. – Барнаул: изд-во АлтГТУ, 2008. – С. 73-75.

4. Supersonic gas jets spectral analysis in the processes of supersonic gas-powder cladding. Radchenko M.V., Suranov A.Ya., Kiselev V.S., Smolin V.S./ The Third International Forum on Strategic Technologies (IFOST-2008). – Новосибирск: изд-во НГТУ. – С. 465-466.

5. Диагностика параметров процесса сверхзвуковой газопорошковой наплавки защитных покрытий на опасных промышленных объектах. Радченко М.В., Суранов А.Я., Уварова С.Г., Киселев В.С./ 6-я Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Наука и молодежь". Секция «Энергетика». Подсекция «Автоматизированный электропривод и электротехнологии» / АлтГТУ им. И.И.Ползунова. – Барнаул: http://edu.secna.ru/publish/gorizonty_obrazovania/2009/n11/nim2009/etoe.doc, 2009.

6. Диагностика сверхзвуковых газовых струй в процессах газопорошковой наплавки. Радченко М.В., Киселев В.С., Масалов Д.А./ 6-я Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Наука и молодежь". Секция «Энергетика». Подсекция «Автоматизированный электропривод и электротехнологии» / АлтГТУ им. И.И.Ползунова. – Барнаул: http://edu.secna.ru/publish/gorizonty_obrazovania/2009/n11/nim2009/etoe.doc, 2009.

7. Диагностика сверхзвуковых газовых струй в процессах газопорошковой наплавки защитных покрытий. Радченко М.В., Киселёв В.С., Шевцов Ю.О., Суранов А.Я., Смолин В.С., Уварова С.Г./ Сварка и диагностика, 2009.- № 2. – С. 31-36.

8. Kiselev V.S., Nagorny D.A., Mankovsky S.A. Carrying out of the Automated Electric Drive for the Process of Supersonic Gas-powder Cladding// International Scientific and Practical Conference of Students, Post-graduates and Young Scientists «Modern Techniques and Technologies» (MTT 2007). – Томск: изд-во ТПУ. – С. 51-53.

Подписано в печать 18.02.2010.

Печать – цифровая. Усл.п.л. 1,39.

Тираж 100 экз. Заказ 2010 - 93

Отпечатано в типографии АлтГТУ,
656038, г. Барнаул, пр-т Ленина, 46
тел.: (8–3852) 36–84–61

Лицензия на полиграфическую деятельность
ПЛД №28–35 от 15.07.97 г.