

Маньковский Сергей Александрович

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ  
ЭЛЕМЕНТОВ КОТЛОВ С «КИПЯЩИМ СЛОЕМ» ПУТЕМ СОЗДАНИЯ  
ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ СВЕРХЗВУКОВОЙ ГАЗОПОРШКОВОЙ  
НАПЛАВКОЙ

Специальность 05.03.06 -  
Технологии и машины сварочного производства

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Работа выполнена в Алтайском государственном техническом университете им.И.И. Ползунова

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Радченко М.В.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Гурьев А.М.

кандидат технических наук, профессор  
Чижов В.Н.

Ведущее предприятие: ОАО «АНИТИМ»

Защита состоится 7 мая 2008 года в 10.00 на заседании диссертационного совета Д 212.004.01 при Алтайском государственном техническом университете им. И.И. Ползунова по адресу: 656038, Барнаул, пр. Ленина, 46; факс: 8-(3852)-367-903

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

Автореферат разослан « 01 » ноября 2007 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат технических наук, доцент

Ю.О. Шевцов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Как известно, многие отрасли промышленности, такие как энергетика, являются энерго- и материалоемкими. При длительной эксплуатации рабочие поверхности узлов, механизмов и конструкций, соприкасаясь друг с другом или с агрессивной средой, подвергаются активному изнашиванию, что приводит к потере их работоспособности и выходу из строя. Примером тому является, катастрофически быстрый износ поверхности трубных элементов в котлах с «кипящим слоем», предназначенных для работы на низкосортном твердом топливе.

Принцип действия таких теплоэнергетических установок следующий (рисунок 1): сжатый воздух, подаваемый через специальные форсуночные устройства в топочную камеру котлоагрегата, при взаимодействии с песком образует потоки абразивных частиц, измельчающие топливо в высокотемпературной области около  $650^{\circ}\text{C}$ . Измельчение топлива способствует его полному сгоранию в топочной камере котла.

Основной проблемой при эксплуатации котлоагрегатов данного типа является небольшой срок межремонтного периода 1,5...2,5 месяца, из-за того, что влияние потоков абразивных частиц в высокотемпературной области и окислительное воздействие воздуха с продуктами горения на рабочие поверхности трубных элементов топочной камеры приводят к их активному изнашиванию, потере работоспособности и выходу из строя.

Поэтому **актуальной** является задача экономически обоснованного увеличения срока службы элементов котлоагрегатов, подверженных износу. Для решения поставленной задачи необходимы новые технологии, материалы, оборудование, а также четко сформулированные технические требования, учитывающие характер и условия работы конкретных деталей при эксплуатации. Делая заключение о целесообразности

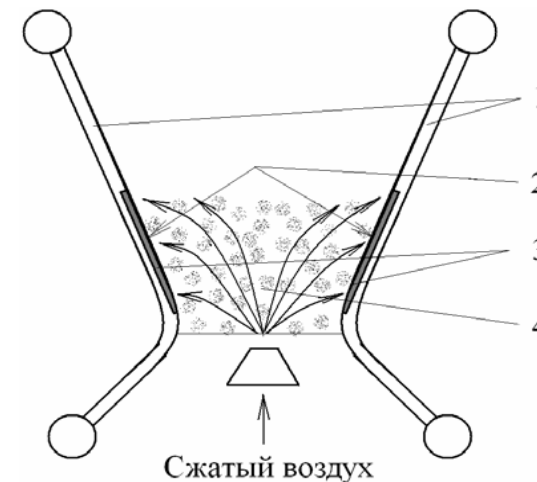


Рисунок 1 – Схема работы котлоагрегата с «кипящим слоем»:

1 – трубные панели, 2 – зона абразивного износа, 3 – защитное  
4 – топливо+песок

элементов котлоагрегатов, подверженных износу. Для решения поставленной задачи необходимы новые технологии, материалы, оборудование, а также четко сформулированные технические требования, учитывающие характер и условия работы конкретных деталей при эксплуатации. Делая заключение о целесообразности

внедрения той или иной технологии, особое внимание следует обращать на экономические факторы.

Многолетняя практика создания защитных слоев металла говорит о том, что при использовании концентрированных потоков энергии возможно получать наиболее качественные покрытия, то есть с однородной структурой. Также известно, что чем однороднее структура, тем выше стойкость материала сопротивляться разрушению. Широко известны работы, в которых рассматриваются различные аспекты создания защитных покрытий с использованием газотермических методов и концентрированных потоков энергии, таких авторов, как Б.Е. Патон, Б.А. Мовчан, О.К. Назаренко, А.А. Кайдалов, А.Л. Тихоновский, Н.А. Ольшанский, И.В. Зуев, М.В. Радченко, Г.А. Месяц, И.Л. Поболь, В.Е. Панин, В.В. Башенко, М.Ф. Жуков, В.С. Чередниченко, О.П. Солоненко, А.С. Аньшаков, В.В. Марусин и др.

В данной работе для решения задачи повышения надежности, увеличения эксплуатационного ресурса наиболее интенсивно изнашивающихся деталей, на основании сравнительного анализа способов нанесения защитных покрытий предлагается использовать альтернативный способ упрочнения и восстановления рабочих поверхностей методом сверхзвуковой газопорошковой наплавки (СГП-наплавки). Этот метод обладает рядом технико-экономических преимуществ перед иными способами упрочнения: увеличение концентрации теплоты, относительная простота реализации процесса нанесения покрытий, универсальность применения. При этом стоимость оборудования для наплавки и затраты на эксплуатацию в 3...5 раз ниже, чем при плазменном способе наплавки аналогичных покрытий.

Предварительные исследования уровня качества покрытий, наплавленных методом дозвуковой газопорошковой наплавки, показали, что данная технология требует дальнейшего развития и совершенствования. Работа выполнялась в рамках федеральной программы «Старт 05».

**Цель работы.** Разработка технологических основ процесса создания защитных износостойких покрытий методом сверхзвуковой газопорошковой наплавки высоколегированных сплавов на поверхность трубных элементов котельных установок с «кипящим слоем».

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

1. Обосновать выбор способа и материалов для нанесения защитных покрытий на трубные элементы котлоагрегатов с «кипящим слоем».
2. Провести выбор методов качественного и количественного анализа механических и эксплуатационных свойств защитных покрытий.
3. Выявить механизм влияния сверхзвукового газового потока на структуру и свойства защитных покрытий.
4. Установить технологические особенности сверхзвукового газового потока применительно к процессу газопорошковой наплавки по сравнению с дозвуковым газовым потоком.

5. Сформулировать технологические рекомендации по СГП-наплавке.

**Методы исследований.** В работе использовались как стандартные, так и оригинальные методы экспериментальных исследований наплавленных покрытий. Качественные характеристики наплавленных слоев исследовались методами дюротметрии, микроструктурного, рентгеноструктурного анализов. Эксплуатационные свойства определялись испытаниями на износостойкость по различным схемам изнашивания. Наплавка производилась с помощью устройства для сверхзвуковой газопорошковой наплавки, разработанного и запатентованного авторским коллективом ООО «НИИ Высоких Технологий» на образцах-имитаторах элементов котлоагрегатов с «кипящим слоем».

Исследования микроструктуры наплавленных покрытий проводились с использованием оптического микроскопа типа ММР-4. Фазовый рентгеноструктурный анализ выполнялся с помощью рентгеновского дифрактометра ДРОН-2.0. Определение карбидной и боридной составляющей выполнялось в соответствии с ГОСТ 5639-82, при этом учитывались насыщенность, равномерность распределения, размер и количество упрочняющей фазы.

Микротвердость наплавленных слоев измерялась по стандартной методике на приборе ПМТ-3М с использованием фотоэлектрического окулярного микрометра ФОМ-2 (точность 0,01 мм).

Исследования износостойкости проводились по схемам изнашивания о незакрепленные частицы абразива и жестко закрепленные частицы абразива на машине трения МИ-1М. Весовой износ образцов определялся с помощью весов ВЛР-200 (точность 0,1 мг).

Все расчеты и обработка экспериментальных данных проводилась с использованием компьютерной техники. Достоверность полученных результатов при решении поставленных в диссертационной работе задач обеспечивалась использованием современных серийных приборов, технологического оборудования, компьютерной техники и стандартных методов экспериментальных и теоретических исследований, количеством повторений опытно-экспериментальных исследований.

#### **Научная новизна работы:**

1. Впервые теоретически обоснована и экспериментально подтверждена целесообразность использования в качестве теплового источника сверхзвуковых газовых струй для газопорошковой наплавки защитных покрытий на изнашиваемых трубных элементах котельных установок с «кипящим слоем».

2. Выявлен механизм влияния сверхзвукового газового потока на структуру и свойства защитных покрытий, заключающийся в следующем:

- увеличенная концентрация теплоты в сверхзвуковом газовом потоке по сравнению с дозвуковым способствует получению структуры в виде никелевой матрицы, насыщенной мелкодисперсными карбидными и боридными включениями (2,0...3,0 мкм) глобулярной формы, равномерно распределенными по покрытию на примерно одинаковом расстоянии друг от друга, что отвечает требованиям высоких качественных показателей износостойких покрытий.

- значения микротвердости имеют более стабильные показатели, меньший разброс и равномерное распределение упрочняющей фазы, что определяет их более высокую работоспособность по сравнению с покрытиями, наплавленными дозвуковой наплавкой;

- износостойкость покрытий с толщиной 1,5...2,0 мм повышается в 3,6...4,0 раза по сравнению с дозвуковой газопорошковой наплавкой.

3. Выявлены технологические особенности сверхзвукового газового потока применительно к процессу газопорошковой наплавки по сравнению с дозвуковым газовым потоком:

- уменьшение расхода горючего и окислительного газов при одинаковом давлении: кислорода - в 1,3...2,0 раза, пропана в 1,3...1,8 раза;

- уменьшение длины факела пламени в 3...5 раз;

- уменьшение времени нагрева в 1,8...2 раза;

- увеличение скорости наплавки в 1,8...2 раза;

- формирование более узких наплавленных валиков (5...10 мм);

- уменьшение размеров пятна нагрева и повышение концентрации теплоты в пятне нагрева в 4...5 раз.

#### **Практическая значимость работы.**

1. По итогам результатов исследований разработаны научно-обоснованные технологические рекомендации по реализации процесса сверхзвуковой газопорошковой наплавки защитных покрытий на трубных элементах теплоэнергетических установок с использованием серийно выпускаемых в России материалов на основе Ni-Cr-B-Si сплавов с фракцией 40...100 мкм.

2. Экспериментально установлены рациональные технологические режимы процесса сверхзвуковой газопорошковой наплавки: скорость наплавки – 6...9 м/ч, дистанция наплавки - 25...30 мм, давление горючего газа (пропана) 0,8...1,0 атм., окислительного газа (кислорода) 4,5...5 атм., при которых создаются условия, позволяющие получать покрытия с высокой износостойкостью. Так в сравнении со сталью 20К, из которой изготавливаются трубы теплообменников котлов с «кипящим слоем», износостойкость повысилась в 8,5...9 раз, а в сравнении с покрытиями, выполненными дозвуковой наплавкой в 3,6...4,0 раза.

3. Научно-технические решения, полученные в работе, позволяют решить проблему повышения эксплуатационной стойкости изнашиваемых поверхностей котлоагрегатов с «кипящим слоем», приняты и планируются к дальнейшему использованию на предприятии ОАО «Бийский котельный завод».

**Вклад автора** в представленной работе состоит в выполнении анализа технической литературы, организации выполнения экспериментов и обработке их результатов. Формулирование основных положений, выводов и технологических рекомендаций.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Обоснование применения способа СПП-наплавки и выбора порошковых сплавов системы Ni-Cr-B-Si для создания защитных покрытий, обеспечивающих

высокие показатели износостойкости поверхности на трубных элементах котлоагрегатов с «кипящим слоем»;

2. Совокупность результатов экспериментальных исследований и обобщений характеристик структурно-фазового состава, механических и эксплуатационных свойств покрытий, полученных методом СПП-наплавки;

3. Алгоритм создания защитных х покрытий методом сверхзвуковой газопорошковой наплавки;

4. Результаты экспериментальных сравнительных исследований технологических характеристик дозвукового и сверхзвукового газовых потоков.

5. Рациональные технологические режимы процесса СПП-наплавки;

**Апробация работы.** Основные результаты работы представлялись и докладывались на региональных, всероссийских и международных конференциях по вопросам современных ресурсосберегающих технологий, а также межкафедральных научно-технических семинарах:

Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе». – г. Новосибирск, 2005 г.; Всероссийской конференции аспирантов и студентов – победителей I тура Конкурса инновационных проектов аспирантов и студентов по приоритетному направлению «Энергетика и энергосбережение». – г. Барнаул, 2005 г.; Всероссийской научной конференции молодых ученых в 7-ми частях «Наука. Технологии. Инновации» г. Новосибирск, 2006 г.; Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Оборона. Промышленность» г. Новосибирск, 2006 г.; Международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения Т.В. Ершова «Современные технологические системы в машиностроении (СТСМ – 2006)» г. Барнаул, 2006 г.; The twelfth International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists «Modern Techniques and Technologies». – Tomsk, 2007. Материалы диссертации неоднократно обсуждались на научно-технических семинарах кафедры «Малый бизнес и сварочное производство» АлтГТУ.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 11 работ, в том числе 1 публикация в журнале из списка, рекомендованного ВАК, 1 отчет о НИР, публикации в сборниках докладов на международных и региональных конференциях. Получен 1 патент на полезную модель №60410.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов по работе, списка использованной литературы и приложений. Диссертация изложена на 156 страницах, в том числе содержит 54 рисунка, 15 таблиц, список литературы из 72 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность изучаемой в диссертации проблемы, сформулированы цель и задачи исследования, показаны методы исследований,

научная новизна и практическая ценность результатов работы, сформулированы положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** представлен краткий анализ проблемы ресурсосбережения в теплоэнергетике, которая в настоящее время приобретает особое значение. Приведен обзор технической литературы и анализ конструкции котлоагрегата с «кипящим слоем», материалов и способов нанесения защитных покрытий наиболее подходящих для решения проблемы ресурсосбережения котлоагрегатов с «кипящим слоем». Показано, что применение котлоагрегатов данного типа выгодно, так как они обладают рядом преимуществ по сравнению с другими типами котельных установок. Однако основной проблемой является потеря работоспособности ранее плановых сроков из-за того, что при длительной эксплуатации в агрессивных средах рабочие поверхности элементов котлоагрегатов с «кипящим слоем» подвергаются преимущественно абразивному и коррозионному износу.

Эту проблему в работе предполагается решить применением новых современных высокотехнологичных способов нанесения защитных покрытий на изнашиваемые поверхности. Предварительный экономический анализ показал, что наиболее предпочтительными являются газопламенные методы с использованием сверхзвуковых газовых струй и высоколегированных порошковых сплавов.

**Во второй главе** выполнен анализ современных материалов для наплавки защитных покрытий и обоснование выбора материалов для создания на элементах котлоагрегатов с «кипящим слоем» износостойких покрытий. Представлена характеристика используемой технологической аппаратуры для газопорошковой наплавки. Дана краткая характеристика методик изучения микроструктуры, фазового состава и физико-механических свойств защитных износостойких покрытий. С целью исследования микроструктуры наплавленного покрытия использовалась методика световой микроскопии. Структурные исследования проводились на оптическом микроскопе типа ММР-4, позволяющем получать четкие изображения при различных увеличениях, а также использовать для съемки микроструктуры цифровую фотокамеру, позволяющую получать качественные снимки. Фотографии микроструктур, полученные с помощью цифровой фотокамеры Nikon 4300, выполнялись при увеличении до 1000 раз для более четкого и наглядного изображения микроструктуры. Съемка производилась на основном, наплавленном металле и границе сплавления. Методика количественного анализа (ГОСТ 5639-82) карбидной фазы применялась для определения интенсивности и равномерности распределения, размера и количества карбидной составляющей в наплавленном покрытии.

С целью определения фазового состава наплавленных покрытий был применен фазовый рентгеноструктурный анализ. Съемка рентгенограмм выполнялась с помощью рентгеновского дифрактометра ДРОН-2.0, с использованием монохроматического излучения изотопов кобальта  $Co^{57}$ , что обеспечивало получение четких, неразмытых дифракционных пиков для идентификации фазовых составляющих.



С целью более детального исследования свойств наплавленных покрытий проводились испытания на микротвердость, как показателя однородности состава покрытий, при одновременном определении общего уровня изменения твердости. Распределение микротвердости качественно характеризует микроструктуру исследуемого материала, ее однородность или неоднородность, насыщенность упрочняющей фазой, равномерность расположения твердой фазы в матрице, что определяет способность материалов покрытий сопротивляться абразивному износу.

С целью изучения способности материала сопротивляться воздействию абразивных частиц также использовалась методика сравнительных испытаний наплавленных слоев на сопротивление механическому изнашиванию о жестко закрепленные частицы по ГОСТ 17367-71.

Показано, что среди выпускаемых промышленностью порошковых сплавов в качестве износостойких наиболее часто используются высоколегированные самофлюсующиеся сплавы системы Ni-Cr-B-Si типа ПГ-CP2...ПГ-CP4. В таких сплавах износостойкость обеспечивается наличием хрома (11...18 %), образующего карбиды. Технологичность таких сплавов в процессе наплавки определяется хорошей смачиваемостью, низкой температурой плавления эвтектики (1050°C); наличием флюсообразующих компонентов (Si и B) в исходном составе предопределяет равномерность распределения легирующих элементов в материале наплавленного слоя.

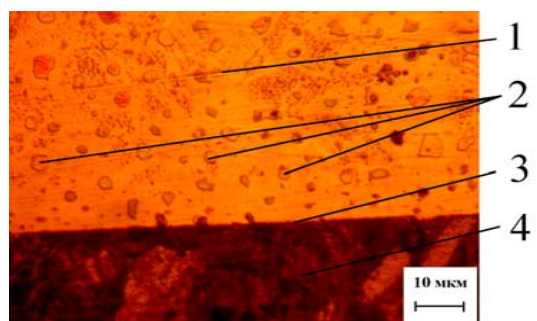
В качестве базового метода для математического моделирования процессов получения защитных покрытий был выбран метод наименьших квадратов (МНК), позволяющий с определенной степенью достоверности строить математические модели на основе экспериментальных данных.

С использованием этого метода в результате произведенных необходимых расчетов, была определена степень влияния технологических параметров процесса на эксплуатационные свойства защитных покрытий и созданы предпосылки для дальнейших расчетов применительно к процессу СПП-наплавки.

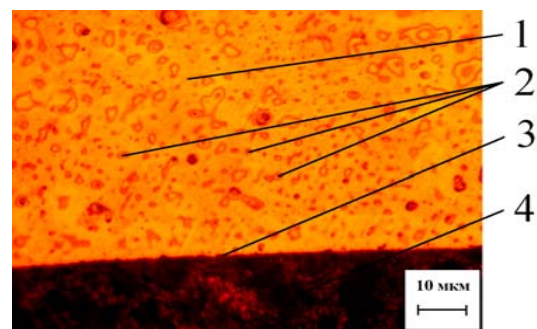
**В третьей главе** представлены результаты комплексных экспериментальных сравнительных исследований влияния технологических параметров дозвуковой и сверхзвуковой газопорошковой наплавки на микроструктуру, фазовый состав, распределение карбидов и боридов, микротвердости, износостойкость наплавленных покрытий. Наплавка выполнялась дозвуковым и сверхзвуковым газовым пламенем на аппаратуре для дозвуковой и сверхзвуковой газопорошковой наплавки при вертикальном и горизонтальном положениях источника нагрева.

Анализ микроструктуры (рисунок 2), и результаты рентгеноструктурного анализа (рисунок 5), позволяют сделать вывод о том, что при дозвуковой и сверхзвуковой газопорошковой наплавке покрытие представляет собой никелевую матрицу, насыщенную карбидными и боридными включениями преимущественно глобулярной формы, распределенными по покрытию на примерно одинаковом расстоянии друг от друга, что, в конечном счете,

положительно влияет на качественные показатели покрытий. Это подтверждается данными, полученными при исследованиях покрытий на износостойкость. Однако при сверхзвуковой газопорошковой наплавке карбиды и бориды имеют сравнительно меньший размер - 2,0...3,0 мкм, расположены на более близком и одинаковом расстоянии 1,0...3,0 мкм друг от друга. Равномерность распределения карбидов и боридов в никелевой матрице как вблизи, так и по мере удаления от границы сплавления позволяет говорить о гомогенности (однородности) наплавленного покрытия.



а)



б)

Рисунок 2 – Характерная микроструктура металла, наплавленного газопорошковой наплавкой а) дозвуковой, б) сверхзвуковой: 1 – наплавленный металл, 2 – карбиды, 3 – граница сплавления, 4 – основной металл (сталь 20К)

Структура основного металла феррито-перлитная без следов перегрева и пережога, что свидетельствует о том, что воздействие источника нагрева как при дозвуковой, так и при сверхзвуковой газопорошковой наплавке не приводит к изменению структуры основного металла.

Граница сплавления защитного покрытия и основного металла при обоих процессах наплавки относительно ровная, что положительно сказывается на надежности сплавления покрытия с основой, что также подтверждается результатами исследования микротвердости по границе сплавления. Однако следует отметить, что при сверхзвуковой газопорошковой наплавке граница сплавления более четкая.

Так как в производственных условиях цеха, котлоагрегат с «кипящим слоем» находятся в разобранном состоянии, то наплавка на его элементы, в частности на экраны, как правило, осуществляется в нижнем положении (вертикальное положение газовой струи и горизонтальное - изделия). В условиях ремонта котлоагрегата с «кипящим слоем» на месте его эксплуатации, он находится в собранном состоянии, при этом его элементы располагаются вертикально, поэтому в этом случае при наплавке покрытий используется горизонтальное пространственное положение газовой струи на вертикальной плоскости.

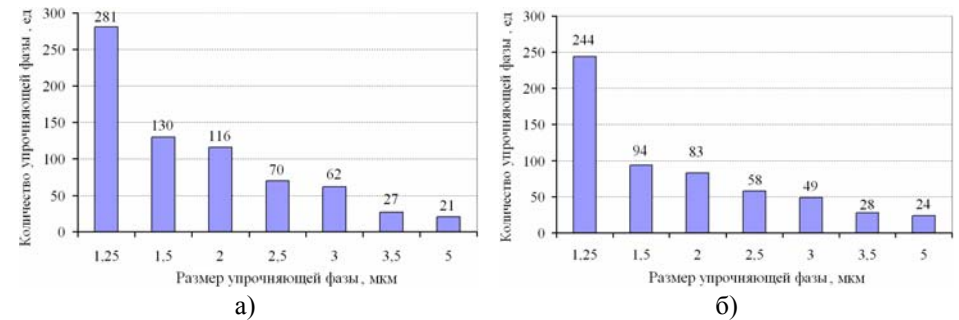


Рисунок 3 – Гистограмма упрочняющей фазы в покрытиях, наплавленных при вертикальном (а) и горизонтальном (б) положениях источника нагрева

Как видно из рисунка 3, различие в количестве карбидов и боридов на единице площади покрытия, наплавленного при вертикальном и горизонтальном положениях источника нагрева, не существенно. Это говорит о стабильности получаемых результатов и независимости процесса наплавки от пространственного положения источника теплоты.

При исследовании микротвердости, исходя из графиков представленных на рисунке 4, отмечено, что у покрытий, наплавленных сверхзвуковой газопорошковой наплавкой, по сравнению с дозвуковой газопорошковой наплавкой более стабильные показатели, меньший разброс и равномерное распределение значений микротвердости. Это означает, что такое покрытие более однородное, то есть имеет равновесную структуру и равномерное распределение карбидных состав-

ляющих, а следовательно более работоспособное по сравнению с покрытием, наплавленным дозвуковой наплавкой.

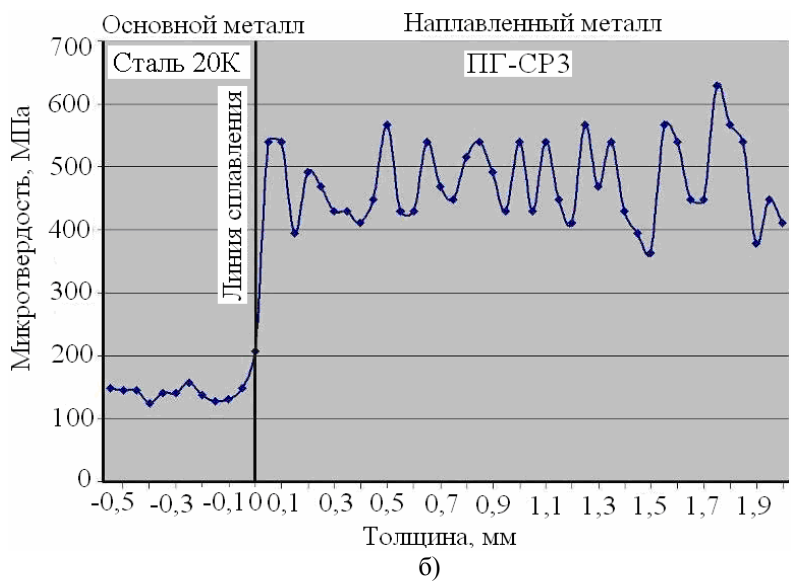
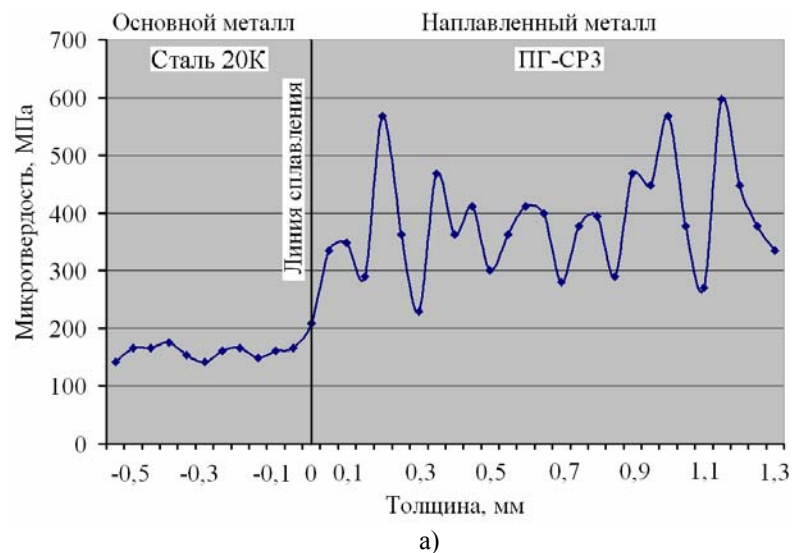


Рисунок 4 – Характерное распределение значений микротвердости в защитных покрытиях при газопорошковой наплавке: дозвуковой (а) и сверхзвуковой (б)

Фазовый рентгеноструктурный анализ подтвердил наличие карбидной и боридной составляющей в наплавленном покрытии.

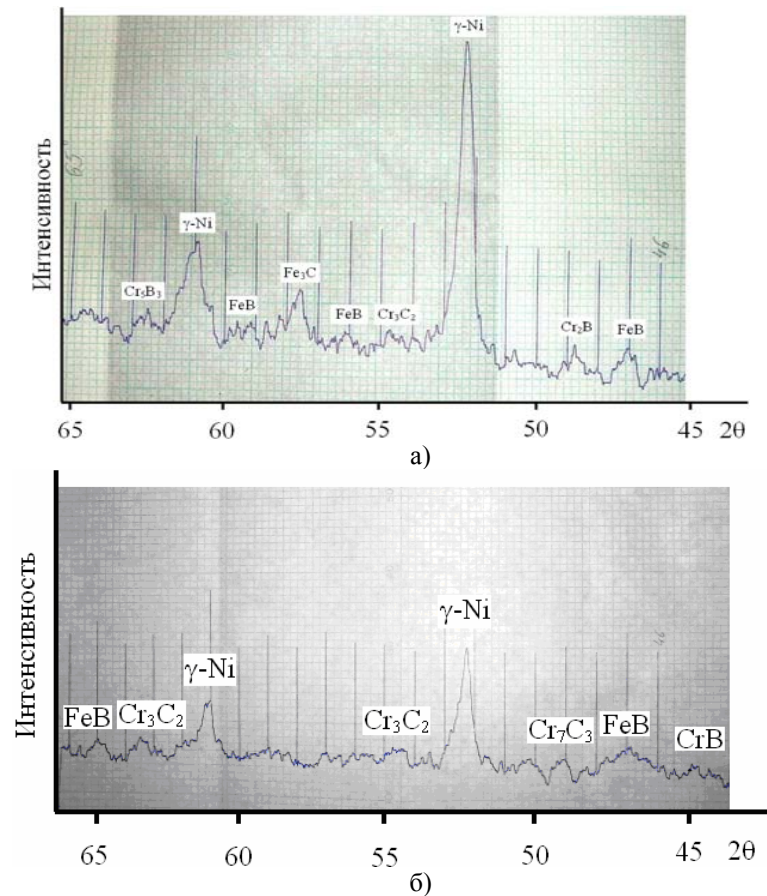


Рисунок 5 – Фазовый состав наплавленного защитного покрытия:  
а) дозвуковая наплавка, б) сверхзвуковая наплавка

В защитном покрытии, выполненном дозвуковой и сверхзвуковой газопорошковой наплавкой, основным материалом является твердый раствор легирующих элементов в  $\gamma$ -Ni. Однако при сверхзвуковой газопорошковой наплавке, наряду с карбидами типа  $\text{Fe}_3\text{C}$ ,  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ ,  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ , присутствуют также бориды  $\text{FeB}$ ,  $\text{Cr}_2\text{B}$ ,  $\text{Cr}_3\text{B}_3$ ,  $\text{CrB}_2$ , что предопределяет более высокие показатели износостойкости. Судя по физическому уширению на пиках рентгенограмм, величина микронапряжений в защитном покрытии при обоих способах наплавки незначительна.

Анализ результатов изнашивания наплавленных покрытий показал, что износостойкость образцов, выполненных дозвуковой наплавкой, как с толщиной покрытия  $h=1,5...2,0$  мм, так и  $h=1,0...1,5$  мм имеет по сравнению с эталоном (сталь 45 в закаленном состоянии) незначительные различия - в 1,1...1,3 раза выше и по сравнению с износом образцов из стали 20К - в 2,0...2,6 раза выше (рисунок 6).

Износостойкость образцов, выполненных сверхзвуковой наплавкой, с толщиной покрытия  $h=1,0...1,5$  мм по сравнению с эталоном выше в 1,8... 2,0 раза, по сравнению с образцами из стали 20К – в 3,5...4,0 раза выше; с толщиной покрытия  $h=1,5...2,0$  мм по сравнению с эталоном выше в 4,0...4,5 раза, по сравнению с образцами из стали 20К – в 8,5...9,0 раза выше.

Износостойкость образцов с толщиной покрытия  $h=1,0...1,5$  мм, выполненных сверхзвуковой газопорошковой наплавкой в 1,5 раза выше износостойкости образцов, выполненных дозвуковой газопорошковой наплавкой. Износостойкость образцов с толщиной покрытия  $h=1,5...2,0$  мм, выполненных сверхзвуковой газопорошковой наплавкой в 3,6...4,0 раза выше износостойкости образцов, выполненных дозвуковой газопорошковой наплавкой.

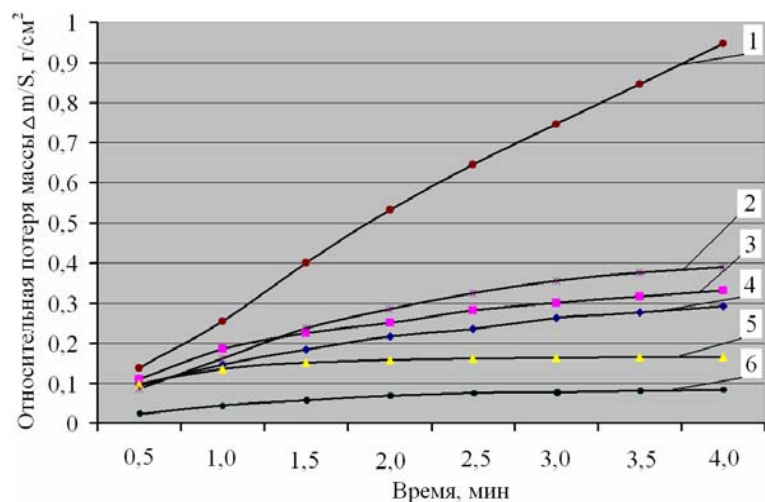


Рисунок 6 – Износостойкость покрытий о закрепленные абразивные частицы: 1 – сталь 20К, 2 – сталь 45 (эталон), 3, 4 – валики, наплавленные дозвуковой газопорошковой наплавкой  $h=1,5...2,0$  мм и  $h=1,0...1,5$  мм соответственно, 5, 6 – валики наплавленные сверхзвуковой газопорошковой наплавкой  $h=1,0...1,5$  мм и  $h=1,5...2,0$  мм соответственно

Установлено, что с увеличением толщины покрытия, увеличивается износостойкость. Так у покрытий при толщине равной  $h=1,5...2,0$  мм износостой-

кость повышается примерно в 2 раза по сравнению с толщиной покрытия  $h = 1,0 \dots 1,5$  мм.

В результате исследований установлено, что с помощью сверхзвуковой газопорошковой наплавки, можно получать покрытия с толщиной  $1,5 \dots 2,0$  мм, которые обладают структурой с равномерным распределением упрочняющей фазы и достаточно высокой износостойкостью по сравнению с дозвуковой газопорошковой наплавкой (в  $3,6 \dots 4,0$  раза).

Результаты исследований показали, что характер микроструктуры и механических свойств наплавленных покрытий в значительной степени зависят от технологических особенностей и режимов наплавки.

Важным для качества наплавленных покрытий является соблюдение режима наплавки, в частности таких параметров, как скорость наплавки, дистанция наплавки, расход порошка, расход газов. При длительном времени оплавления происходит растворение карбидов, что приводит к снижению твердости и износостойкости покрытия. В то же время при малом времени оплавления порошковых сплавов газы не успевают выйти на поверхность, образуя дефекты металлургического характера (поры).

Как показали результаты экспериментальных исследований, газопорошковая наплавка происходит в узком интервале режимов, обеспечивающих удовлетворительное формирование наплавленных валиков с точки зрения износостойкости. Формирование валиков обеспечивается в интервале скоростей для дозвуковой наплавки  $V_n = 3 \dots 5$  м/ч – режимы 3, 7, на дистанции наплавки  $20 \dots 25$  мм, для сверхзвуковой -  $V_n = 6 \dots 9$  м/ч на дистанции наплавки  $25 \dots 30$  мм. Давление горючего и окислительного газов для дозвуковой и сверхзвуковой наплавки одинаково: на редукторе кислорода  $4,5 \dots 5$  атм., на редукторе пропана  $0,8 \dots 1,0$  атм. Увеличение скорости наплавки приводит к несплавлению и формированию неравновесной структуры, а ее снижение - к перегреву подложки и растворению карбидов.

Причем фазовый рентгеноструктурный анализ показал, что в покрытиях, наплавленных на минимальных  $V_n$  из указанных интервалов, время теплового воздействия источника нагрева на наплавленный металл продолжительнее, что способствует появлению в нем четко выраженных карбидных и боридных фаз, по сравнению с покрытиями, наплавленными на максимальных значениях  $V_n$  из указанных интервалов, где пики карбидных и боридных фаз не всегда четко выявлены, что говорит о значительно меньшем размере указанных включений.

В результате экспериментально-технологических исследований были выявлены особенности применения сверхзвукового потока газа применительно к процессу газопорошковой наплавки по сравнению с дозвуковым:

- уменьшение расхода горючего и окислительного газов при одинаковом давлении: кислорода - в  $1,3 \dots 2,0$  раза, пропана - в  $1,3 \dots 1,8$  раза;
- уменьшение длины факела пламени в  $3 \dots 5$  раз;
- уменьшение времени нагрева в  $1,8 \dots 2$  раза;
- увеличение скорости наплавки в  $1,8 \dots 2$  раза;
- формирование более узких наплавленных валиков ( $5 \dots 10$  мм);

- уменьшение размеров пятна нагрева и повышение концентрации теплоты в пятне нагрева в 4...5..

**В четвертой главе** приведены результаты внедрения технологии газопорошковой наплавки на ОАО «Бийский котельный завод».

В заводских условиях ОАО «Бийский котельный завод» сначала по технологии дозвуковой газопорошковой наплавки были созданы защитные покрытия на участки трубных панелей, подверженные высокотемпературному газоабразивному износу (рисунок 7 - стрелкой показаны участки трубных панелей котлоагрегата с наплавленным покрытием). Проведенные в течение двух лет эксплуатационные испытания трех котлоагрегатов типа КВ-Ф-10-115-НТКС с низкотемпературной топкой с «кипящим слоем» с наплавленными трубными панелями, в условиях котельной г. Борзя показали следующее.

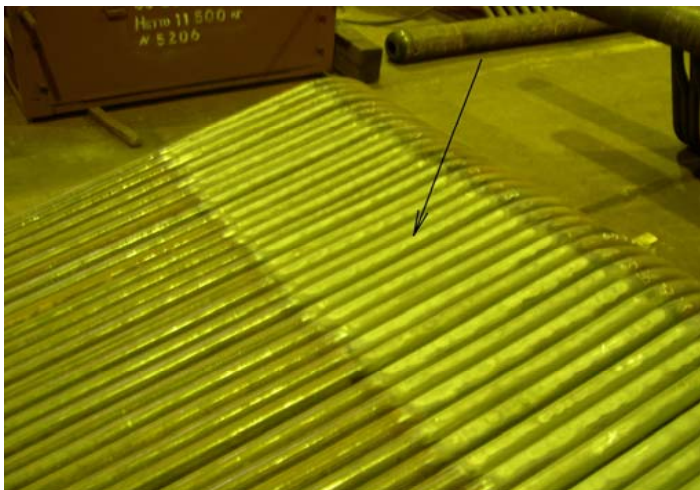


Рисунок 7 - Износостойкие защитные покрытия на поверхности трубных панелей котлоагрегатов с «кипящим слоем», выполненные методом дозвуковой газопорошковой наплавки

1. Межремонтный период котлоагрегатов с незащищенными экранными трубными панелями в зависимости от типа углей (каменный или бурый) составляет 1,5...2,5 месяца. Обследования, проведенные во время остановки котлоагрегатов с наплавленными трубными панелями после 2 лет эксплуатации, следов износа не выявили, что подтверждается актом производственных испытаний. Эксплуатация котлоагрегата продлена еще на 1 год. Таким образом, стойкость трубных панелей с наплавленными защитными покрытиями при работе в условиях воздействия абразивных частиц в высокотемпературной области повышается не менее чем в 10...12 раз.



2. При стоимости ремонта одного котлоагрегата с заменой комплекта экранных труб порядка 600 тыс. рублей реальный экономический эффект от внедрения технологии дозвуковой газопорошковой наплавки на одном котлоагрегате составил 3,6 млн. рублей в год.

С учетом полученных экспериментальных данных по СГП-наплавке расчетным путем определено, что при использовании технологии сверхзвуковой газопорошковой наплавки следует ожидать дополнительное увеличение износостойкости в 3...4 раза по сравнению с дозвуковой наплавкой и рекомендовать этот способ для производства.

Таким образом, по результатам представленной работы сформулированы технологические рекомендации по принципиальному решению проблемы повышения износостойкости трубных панелей и промышленной безопасности при эксплуатации котлоагрегатов с «кипящим слоем» – изготовление таких котлоагрегатов с трубными панелями, имеющими защитные покрытия, заранее наплавленные по технологии сверхзвуковой газопорошковой наплавки.

**Результаты и выводы.** Диссертационная работа посвящена решению актуальной проблемы - повышению надежности и долговечности деталей и элементов теплоэнергетических установок, работающих в условиях комплексного высокотемпературного, абразивного и коррозионного изнашивания, путем создания на изнашивающихся поверхностях защитных покрытий по технологии сверхзвуковой газопорошковой наплавки.

На основе выполненных исследований сделаны следующие выводы:

1. Впервые теоретически обоснована и экспериментально подтверждена целесообразность использования сверхзвуковых газовых струй для создания на поверхности деталей котлов износостойких защитных покрытий методом газопорошковой наплавки высоколегированными сплавами.

2. В результате анализа существующих материалов для создания защитных покрытий установлено, что при сверхзвуковой газопорошковой износостойкой наплавке защитных покрытий можно использовать промышленно выпускаемые в России порошковые самофлюсующиеся материалы системы Ni-Cr-B-Si с фракцией 40...100 мкм.

3. Установлены рациональные диапазоны технологических режимов процесса сверхзвуковой газопорошковой наплавки: скорость наплавки – 6...9 м/ч, дистанция наплавки - 25...30 мм, давление горючего газа (пропана) 0,8...1,0 атм., окислительного газа (кислорода) 4,5...5 атм., при которых создаются условия, позволяющие получать покрытия с достаточно высокой износостойкостью. Так в сравнении со сталью 20К, из которой изготавливаются трубы теплообменников котлов с «кипящим слоем», износостойкость повысилась 8,5...9 раз, а в сравнении с покрытиями, выполненными дозвуковой наплавкой в 3,6...4,0 раза.

4. Проведены комплексные исследования структурно-фазового состава, механических и эксплуатационных свойств защитных покрытий системы Ni-Cr-B-Si, полученных по разработанной технологии сверхзвуковой газопорошковой наплавкой, в результате которых установлено:

- увеличенная концентрация теплоты сверхзвукового газового потока способствует получению структуры в виде никелевой матрицы, насыщенной мелкодисперсными карбидными и боридными включениями глобулярной формы размером 2,0...3,0 мкм равномерно распределенными по покрытию на примерно одинаковом расстоянии друг от друга, что отвечает требованиям высоких качественных показателей покрытий.

- значения микротвердости имеют более стабильные показатели, меньший разброс и равномерное распределение. Это свидетельствует о том, что такие покрытия являются гомогенными, то есть имеют структуру с равномерно распределенными карбидами и боридами, а следовательно они более работоспособны по сравнению с покрытиями, наплавленными дозвуковой наплавкой.

- покрытия с толщиной 1,5...2,0 мм обладают износостойкостью в 3,6...4,0 раза выше, чем при дозвуковой газопорошковой наплавке.

5. Выявлены особенности сверхзвукового потока газа применительно к процессу газопорошковой наплавки по сравнению с дозвуковым потоком, заключающиеся в следующем:

- уменьшении расхода горючего и окислительного газов при одинаковом давлении: кислорода - в 1,3...2,0 раза, пропана в 1,3...1,8 раза;

- уменьшении длины факела пламени в 3...5 раз;

- уменьшении времени нагрева металла в 2 раза;

- формировании более узких наплавленных валиков (5...10 мм);

- увеличении скорости наплавки в 1,8...2 раза;

- уменьшении размеров пятна нагрева и повышение концентрации энергии в пятне нагрева в 4...5 раз.

6. На основании выполненных в диссертации исследований разработаны научно-обоснованные технологические рекомендации по созданию защитных покрытий на котлах с «кипящим слоем». Технологические рекомендации положены в основу для использования дозвуковой и сверхзвуковой газопорошковой наплавки деталей теплоэнергетических установок на ОАО «Бийский котельный завод», с расчетным экономическим эффектом при сверхзвуковой наплавке около 10 млн. руб. на одном котлоагрегате.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Радченко М.В., Шевцов Ю.О., Нагорный Д.А., Маньковский С.А., Первалов П.А. Технология создания защитных покрытий на поверхностях котлоагрегатов с «кипящим слоем» сверхзвуковой газопорошковой наплавкой // Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе. Тезисы 3-ей Всероссийской научно-практической конференции 30-31 марта 2005 г. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2005. – С. 51-55.

2. Маньковский С.А., Нагорный Д.А. Практическая реализация защитных износостойких покрытий на элементах котлов с «кипящим слоем», работающих в условиях высокотемпературного абразивного износа // Материалы всероссийской конференции аспирантов и студентов – победителей I тура Конкурса инновационных проектов аспирантов и студентов по приоритетному направлению

«Энергетика и энергосбережение». Материалы конференции / Под общ. ред. А.А. Максименко – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2005.- С. 67-70.

3. Радченко М.В., Шевцов Ю.О., Маньковский С.А., Нагорный Д.А. Проблемы и пути решения вопросов восстановления деталей железнодорожного состава // Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых в 7-ти частях «Наука. Технологии. Инновации» Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. Часть 2. – С. 223-224.

4. Радченко М.В., Шевцов Ю.О., Нагорный Д.А., Маньковский С.А. Эффективные газодинамические методы нанесения защитных покрытий на объектах теплоэнергетики // Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых в 7-ти частях «Наука. Технологии. Инновации» Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. Часть 2. – С. 229-231.

5. Радченко М.В., Маньковский С.А. Комплексные исследования структуры и свойств защитных покрытий, выполненных методом газопорошковой наплавки // Материалы всероссийской научно-технической конференции «Наука. Оборона. Промышленность» Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. - С. 311.

6. Радченко М.В., Шевцов Ю.О., Федоров В.А., Маньковский С.А., Нагорный Д.А. Исследование прочности сцепления покрытия с основой как определяющего фактора качества // Материалы международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения Т.В. Ершова «Современные технологические системы в машиностроении (СТСМ – 2006)» Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2006.- С. 70-73.

7. Радченко М.В., Шевцов Ю.О., Нагорный Д.А., Маньковский С.А., Радченко Т.Б. Разработка технологической аппаратуры для сверхзвуковой газопорошковой наплавки // Обработка металлов №1, 2007.- С. 16-18.

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»(МТТ 2007), Tomsk, Tomsk Polytechnic University. – Tomsk: TPU Press, 26-30 march, 2007. – 51-53 p.

9. Радченко М.В., Шевцов Ю.О., Радченко Т.Б., Маньковский С.А.; Нагорный Д.А., Черемисин П.С. Разработка комплекса автоматизированного оборудования и технологии создания защитных покрытий на деталях котлов с «кипящим слоем»: Отчет о НИР по программе 3438 р/5897 «СТАРТ-05» ООО «НИИ Высоких Технологий». Руководитель М.В. Радченко. Г.Р. № 012.0509888. Инв. № 02.2.007 00277. Барнаул, 2006. – 82 с.

10. 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.

11. Радченко М.В., Шевцов Ю.О., Маньковский С.А., С.Г. Уварова Разработка программного продукта «Прогноз-техно» для исследования зависимости качества защитных покрытий от технологии их напыления // Обработка металлов №4, 2007.- С. 12-15.