На правах рукописи

Уварова Стелла Германовна

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА ЗАЩИТНЫХ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ, ВЫПОЛНЕНЫХ СПОСОБОМ СВЕРХЗВУКОВОЙ ГАЗОПОРОШКОВОЙ НАПЛАВКИ НА ОБЪЕКТАХ РОСТЕХНАДЗОРА

Специальность 05.02.10 –Сварка, родственные процессы и технологии

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Барнаул – 2012

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

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор Радченко Михаил Васильевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор Атрощенко Валерий Владимирович, ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет», зав. кафедрой

кандидат технических наук, доцент Бердыченко Александр Анатольевич, ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И.Ползунова», доцент кафедры

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

Защита состоится 17 мая 2012 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета Д 212.004.01 при ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» по адресу: 656038, Барнаул, пр. Ленина, 46; факс: 8-(3852)-290-765, e-mail: yuoshevtsov@mail.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова».

Автореферат разослан «17» апреля 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент Шевцов Ю.О.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Как известно, такие устройства, как например, строительные, мостовые конструкции, газовые магистрали, энергетическое оборудование относятся к промышленно опасным объектам, подведомственным Ростехнадзору. Участившиеся за последние годы техногенные катастрофы, зачастую связанные со сварными конструкциями, заставляют пересмотреть проблему безопасности сварочного производства, в частности, повышения качества сварных соединений и наплавленных покрытий.

Так проблемы изнашивания рабочих поверхностей обуславливают необходимость развития новых способов поверхностного упрочнения и их практического использования, как при изготовлении, так и при ремонте и реконструкции узлов и деталей установок. Особо остро проблема поверхностного износа проявляется в теплоэнергетике, где интенсивному высокотемпературному газоабразивному износу подвергаются рабочие поверхности таких деталей котлов с «кипящим слоем», как трубы пароперегревателей, колпачки трубных досок, элементы запорной арматуры и др.

При этом разработка и реализация новых технологических методов упрочнения представляет собой довольно сложную проблему, как в производстве, так и в науке. В каждом конкретном случае упрочнения поверхности какой-либо детали требуется индивидуальный подход при выборе того или иного способа наплавки и его технологических параметров.

Использование в качестве источников нагрева концентрированных потоков энергии, в частности, сверхзвуковых газовых струй, и достоинств самофлюсующихся порошковых сплавов делает способ сверхзвуковой газопорошковой наплавки порошковых материалов (СГП-наплавки), одним из наиболее перспективных процессов создания поверхностей с заданными служебными свойствами, имеющим самостоятельное научное и прикладное значение.

Однако, проблема наплавки износостойких покрытий из высоколегированных сплавов сверхзвуковой газовой струей, исследования свойств наплавленного металла еще мало изучена и описана в научно-технической литературе. Анализ технической информации по заявляемой теме выявил крайне малое количество научных публикаций, в которых рассматриваются различные аспекты создания защитных покрытий с использованием сверхзвуковых газовых струй.

Отсутствие обобщающего теоретического анализа, научно-обоснованного выбора технологических режимов создания защитных покрытий с помощью сверхзвуковой ГПН, а значит, и концепции управления качеством покрытий сдерживает использование данного процесса в промышленности.

В этой связи остро стоит вопрос использования математического аппарата для прогнозирования технологических параметров процесса создания защитных слоев сверхзвуковой газопорошковой наплавкой, в частности на

основе износостойких легированных порошковых материалов системы Ni-Cr-B-Si с различными фракциями.

В настоящее время совершенно очевидно, что только использование технических возможностей современной компьютерной техники для комплексного анализа технологических вариантов сварки и наплавки путем моделирования совокупности протекающих в металле процессов, позволит получать оптимальные технологические решения при значительном снижении ресурсоемкости самого процесса разработки.

Поэтому разработка методики прогнозирования качества защитных износостойких покрытий из порошковых самофлюсующихся материалов системы Ni-Cr-B-Si, наплавленных сверхзвуковой газовой струей, особенно на опасных промышленных объектах Ростехнадзора является актуальной проблемой.

Цель работы – повышение уровня безопасности деталей и узлов опасных промышленных объектов с наплавленными покрытиями путём разработки методики прогнозирования характеристик качества с использованием математических программных продуктов (на примере энергетического оборудования).

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

1. Разработать алгоритм формирования программы для прогнозирования параметров качества защитных покрытий системы Ni-Cr-B-Si, наплавленных способом сверхзвуковой газопорошковой наплавки.
2. Провести анализ и обоснованный выбор методик и программных средств обобщения технологических, структурно-фазовых и механических характеристик наплавленных покрытий, определяющих их качественные параметры.
3. Сформировать структуру основных факторов, определяющих качество покрытий, наплавляемых сверхзвуковым газопорошковым потоком и выполнить обоснованный выбор безразмерных критериев, наиболее приемлемых для оценки качества наплавок.
4. Разработать методику прогнозирования качества наплавленных износостойких покрытий применительно к ответственным устройствам Ростехнадзора и провести её апробацию на элементах котельного оборудования.

Методы исследований. В работе использовались аналитические, расчётные и экспериментальные методы исследования. Среди них - анализ критериев подобия применительно к процессу СГП – наплавки, построение регрессионных зависимостей с 3 D-визуализацией полученных результатов взаимосвязи параметров процесса наплавки с использованием программного продукта на основе современного инженерно-технического комплекса “Matlab”, обобщение технологических параметров и физико-механических характеристик наплавленных слоёв, полученных методами металлографического, микроструктурного анализа с целью формирования рекомендаций по улучшению качества наплавок.

При проведении экспериментальных исследований процесса сверхзвуковой газопорошковой наплавки использовались устройство и технология,

разработанные и запатентованные авторским коллективом ООО «НИИ Высоких Технологий» на промышленных образцах технологического оборудования. Экспериментальные данные обрабатывались при помощи компьютерной техники, после чего производилась математическая обработка результатов измерений.

В работе использованы и обобщены результаты, полученные в соавторстве по методикам спектральной диагностики, световой микроскопии, рентгеноструктурного анализа, дюрометрии и определения износостойкости.

Все расчеты и обработка экспериментальных данных проводилась с использованием персональной компьютерной техники. Достоверность результатов диссертационной работы обеспечивалась использованием современных исследовательских приборов, технологического оборудования, компьютерной техники и стандартных методов экспериментальных и теоретических исследований, а также удовлетворительным совпадением теоретических и экспериментальных данных.

Научная новизна работы:

1. Сформирована структура основных факторов, определяющих качество покрытий, наплавляемых сверхзвуковым газопорошковым потоком, состоящая из четырёх блоков: а) состав и параметры рабочей газовой смеси для формирования сверхзвукового потока; б) гранулометрические и скоростные параметры порошковых сплавов для наплавки; в) технологические параметры наплавки и г) теплофизические свойства газового потока и основного металла.
2. Оценена возможность использования для прогнозирования качественных характеристик наплавленного металла безразмерных критериев, используемых в сварочном производстве. Установлено, что для процесса сверхзвуковой газопорошковой наплавки наиболее приемлемым безразмерным критерием, позволяющим оценить качество наплавленного металла, является число Маха в диапазоне М4-М5.
3. Для сложнолегированных сплавов системы Ni-Cr-B-Si, как наиболее известных высокими показателями износостойкости, построены 3 D зависимости между технологическими параметрами наплавки, структурно-механическими характеристиками и износостойкостью покрытий, позволяющие в совокупности выбрать рациональные режимы наплавки, определяющие высокие качественные характеристики наплавленного металла, в частности, как показала практика, износостойкость в 2-2,5 раза выше, чем при дозвуковой наплавке.
4. На основе обобщения теоретических и экспериментальных данных разработана методика прогнозирования качества износостойких покрытий, выполненных способом сверхзвуковой газопорошковой наплавки.

Практическая значимость работы.

1. Разработана методика прогнозирования взаимосвязи технологических параметров наплавки и характеристик их качества, позволяющая обеспечить безопасность эксплуатации конструкций на объектах Ростехнадзора.

2. Результаты диссертационной работы апробированы и показали положительный результат в процессе газопорошковой наплавки износостойких покрытий на элементы котельного оборудования, в частности трубных панелях “котлов с кипящим слоем”, что подтверждено актами предприятий, занимающихся процессами сварки на опасных промышленных объектах.

Ожидаемый экономический эффект от использования разработанной методики прогнозирования качества наплавки в котельном производстве составляет 7,2 млн. рублей в год на единицу котельного оборудования.

Вклад автора в представленной работе состоит в выполнении анализа технической литературы, постановке цели и задач исследования, обосновании, выборе и разработке методик исследования, обобщении результатов совместных экспериментов и обработке их результатов, формулировании основных выводов и технологических рекомендаций.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на региональных, всероссийских и международных конференциях по вопросам сварки и родственных технологий, а также межкафедральных научно-технических семинарах:

ежегодном консультационно-информационном семинаре Национального Агентства Контроля и Сварки – г. Москва, 2008, 2010 г.г.; третьем международном форуме по стратегическим технологиям (IFOST-2008), г. Новосибирск, 2008 г.; 9 международной конференции по электронно-лучевым технологиям, Варна, Болгария, 2009.

Материалы диссертации обсуждались на объединённых научно-технических семинарах кафедр “Малый бизнес в сварочном производстве” и “Автоматизированный электропривод и электротехнологии” АлтГТУ им. И.И. Ползунова в 2008-2011 г.г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11работ, в том числе 4 **публикации в журналах из списка, рекомендованного ВАК**.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов по работе, списка использованной литературы и приложений. Диссертация изложена на 124 страницах, в том числе содержит 53 рисунка, 5 таблиц, список литературы из 87 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проблемы, рассматриваемой в диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, представлено описание методов исследований, научная новизна и практическая ценность результатов работы, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен аналитический обзор современных способов создания защитных покрытий для повышения безопасности деталей и узлов на опасных промышленных объектах и материалов для их реализации. Также выполнен анализ существующих программных продуктов и их применимости к процессу наплавки на опасных промышленных объектах на примере деталей и узлов теплоэнергетических установок, поставлены цель и задачи исследования.

Проблема непрогнозируемого износа рабочих поверхностей особенно актуальна в случаях с различными ответственными конструкциями и сооружениями, такими, как объекты, подведомственные Ростехнадзору.

Практическим примером этому является отрасль теплоэнергетики, где происходит катастрофически опасный износ элементов тепловых, атомных и гидроэлектростанций (как например, Саяно-Шушенская ГЭС). Рабочие поверхности деталей оборудования, в частности, котлов с «кипящим слоем», работающих на региональных низкосортных видах топлив (Эстония, Балтийский регион России, Сибирь, Казахстан, Восточная Сибирь) подвергаются высокоскоростному абразивному износу при высоких (порядка 650 ^{0}C) температурах и окислительному воздействию воздуха с продуктами горения. Поэтому для защиты рабочих поверхностей деталей от данных факторов воздействия требуются жаростойкие износостойкие защитные покрытия, надежно изолирующие и защищающие основной металл.

Эта задача может быть успешно решена применением наплавки и напыления как способов поверхностного упрочнения материалов. При этом применительно к деталям и узлам теплоэнергетических установок при ремонте и упрочнении рабочих поверхностей наиболее часто используются такие источники теплоты, как электрическая дуга, плазменные струи, а также газопламенные смеси кислорода с ацетиленом или пропаном с температурами пламени до 3100 ^{0}C и 2700 ^{0}C соответственно.

В последние 10-15 лет в мировой практике, преимущественно в США и России, появились разработки новых источников нагрева – сверхзвуковых газовых струй, преимущественно для процессов напыления, принципиально непригодных для опасных промышленных объектов. Основная причина – невозможность обеспечения высокой прочности сцепления покрытий с поверхностью деталей для гарантированной безопасности эксплуатации опасных технических устройств. Представителями такого оборудования являются зарубежные установки “JP-5000”, “DJ 2600/2700”, “OSK Carbide Jet”, “Top Gun K”, “MetJet”, а также отечественные типа “Термика-HS”.

При этом зарубежное оборудование работает только на сверхмелких фракциях порошковых сплавов, которые не выпускаются отечественной промышленностью.

Вышеизложенное показывает, что для обеспечения качества покрытий сверхзвуковыми газовыми струями необходимо использовать преимущества процесса наплавки, при котором обеспечивается гарантированное сплавление покрытия с основой. Однако разработанные в России аппаратура и способ сверхзвуковой газопорошковой наплавки отечественных сложнолегированных износостойких сплавов системы Ni-Cr-B-Si являются в настоящее время ещё малоизученными для широкого использования в промышленности.

Совершенно очевидно, что только использование технических возможностей современной компьютерной техники для комплексного анализа технологических вариантов сварки и наплавки путем моделирования совокупности протекающих в металле процессов или использования комплексных программных продуктов позволит получать максимально безопасные технологические решения при значительном снижении ресурсоемкости самого процесса разработки. Анализ информационных ресурсов показал, что лидерами в области моделирования процессов сварки и создания профильных программных продуктов являются МГТУ им.

Н.Э.Баумана, ИЭС им. Е.О.Патона НАН Украины, ТулГУ(Тула). Однако абсолютное большинство программных продуктов рассматривают исключительно процессы сварки. Кроме того, специфика нового многофакторного технологического процесса – сверхзвуковой газопорошковой наплавки, не позволяет напрямую использовать разработанные математические среды для целей прогнозирования качества покрытий, наплавленных этим способом.

Поэтому необходимо среди существующих программных продуктов сделать обоснованный выбор такой базовой модели, которая будет позволять учесть специфику нового процесса – газопорошковой наплавки износостойких покрытий системы Ni-Cr-B-Si сверхзвуковой газовой струёй.

Во второй, методической главе, изложено обоснование использования в работе материалов, аппаратуры и методик аналитических, расчётных и экспериментальных исследований. Представлен разработанный в диссертации алгоритм (*как совокупность действий для решения данной задачи*) формирования методики прогнозирования качества износостойких покрытий применительно к новому процессу сверхзвуковой газопорошковой наплавки (рис. 1). Он заключается в следующем. На первом этапе производится анализ специфических условий реализации процесса в отличие от существующего процесса дозвуковой газопорошковой наплавки.

Из наиболее значимых факторов, способных оказать влияние на изменение характеристик источника теплоты выделяются следующие: 1) высокие скорости газовой струи в процессе наплавки - 500-800 м/с в сравнении со значениями 250-300 м/с - для дозвуковых газовых струй; 2) повышенная на ~500 ^{o}C температура сверхзвукового газового потока на срезе сопла (до 3000 ^{o}C) и 3) повышенная вероятность испарения компонентов наплавляемых самофлюсующихся сложнолегированных сплавов системы Ni-Cr-B-Si, а следовательно, изменения фазового состава и свойств наплавленного металла.

С учётом этих факторов и расчёта безразмерных критериев выполняются системные, комплексные эксперименты с целью набора фактических данных показателей качества покрытий для дальнейшего построения 3 D зависимостей от технологических факторов процесса наплавки и их анализа. По результатам выполненного анализа возможно формирование прогнозных решений в процессе сверхзвуковой газопорошковой наплавки защитных покрытий.

Как известно, в сварочной науке достаточно давно используются т.н. безразмерные критерии, позволяющие выполнить предварительную оценку теплофизической картины в процессе сварки или наплавки, как вероятности получения качественного металла шва или наплавленного слоя.

Поэтому **в третьей главе** выполнен анализ безразмерных критериев, в том числе применяемых в сварочном производстве, и их адекватности процессу СГП-наплавки.

В результате установлено, что исследуемый процесс наплавки, принципиально, может быть рассмотрен с помощью множества безразмерных критериев, имеющих отношение к описанию нестационарного поведения газовых потоков и твёрдого тела (критерии Био (Bi), Кнудсена (Kn), Маха (M), Нуссельта (Nu), Пекле (Pe), Прандтля (Pr), Фурье (Fu) и др.).

Рис. 1. Алгоритм формирования методики прогнозирования свойств покрытий, наплавленных способом СГП-наплавки

В результате установлено, что исследуемый процесс наплавки, принципиально, может быть рассмотрен с помощью множества безразмерных критериев, имеющих отношение к описанию нестационарного поведения газовых потоков и твёрдого тела (критерии Био (Bi), Кнудсена (Kn), Маха (M), Нуссельта (Nu), Пекле (Pe), Прандтля (Pr), Фурье (Fu) и др.).

Анализ этих критериев показал, что ввиду отсутствия фактических сведений о характеристиках сверхзвукового газового потока, насыщенного твёрдыми частицами сложнолегированных сплавов (в данном случае системы Ni-Cr-B-Si) нестационарных по массе и объёму, наиболее приемлемым безразмерным критерием, позволяющим ясно оценить возможность влияния на качество наплавленного металла, является число Маха

$$M = \frac{V}{a},$$

где V - скорость газового потока,

a - скорость звука.

При этом в результате совместных исследований с помощью методики высокоскоростной съёмки быстропротекающих физических явлений в сверхзвуковых газопорошковых струях было установлено, что в диапазоне М4-

М5 сверхзвуковой газопорошковый поток обладает существенно большей стабильностью, чем при М3 (рис. 2).

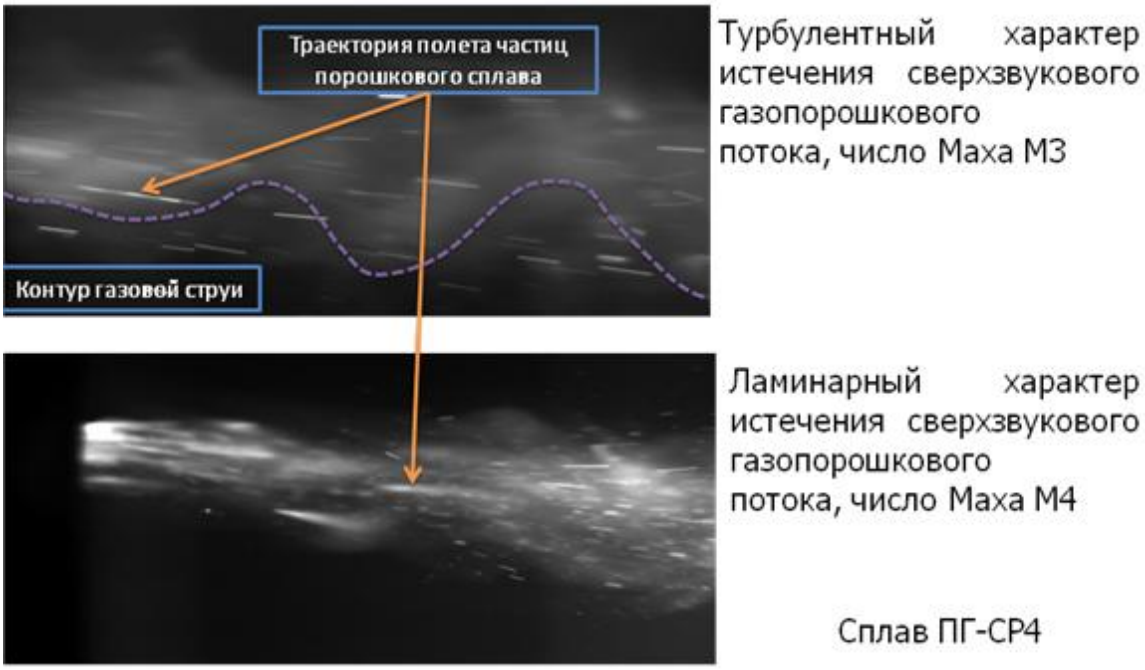
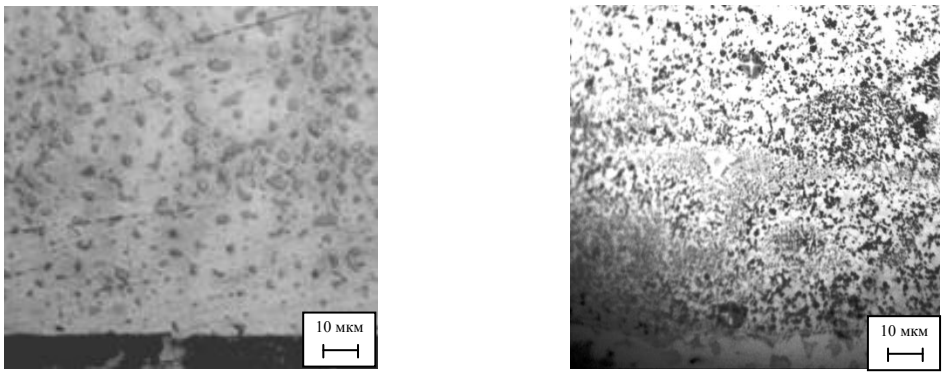


Рис. 2. Характерные фото турбулентного и ламинарного истечения сверхзвукового газопорошкового потока в процессе наплавки покрытий

Как показали дальнейшие экспериментальные исследования, более плотная в видимом спектре по своему сечению газопорошковая струя при числе Маха М5, в отличие от распределённой, в процессе наплавки способствует формированию стабильных по внешнему виду наплавленных защитных покрытий, а также позволяет предполагать сохранение и повторяемость качественных характеристик наплавленных покрытий, в частности фазового состава по всему объёму наплавленного металла, а соответственно характеристик износостойкости, как искомой величины (рис. 3).

На следующем этапе исследований выполнен анализ зависимости качественных характеристик наплавленных покрытий от технологических параметров процесса СГП-наплавки с помощью программного продукта “Прогноз-Техно”.



а) б)

Рис. 3. Микроструктура сплава ПГ-СР3, наплавленного сверхзвуковой газопорошковой струёй в турбулентном (а) и ламинарном (б) режиме течения газа

Для этого аналитически была составлена структура основных факторов, определяющих качество защитных покрытий, наплавляемых сверхзвуковым газопорошковым способом (рис. 4).

Рис. 4. Структура основных факторов, определяющих качество защитных покрытий

В результате проведенных исследований было выявлено, что по параметру “состав рабочей смеси” наиболее важными являются: давление кислорода и пропана; по параметру “размер оплавляемой зоны”: температура пламени и дистанция от среза сопла до защищаемой поверхности; по параметру “равномерность перемещения горелки”: продольная скорость перемещения горелки; по параметру “порошковый материал”: состав и скорость подачи. Таким образом, на основании анализа факторов, представленных на рис. 3, можно выделить восемь, которые оказывают наибольшее влияние на качество получаемого защитного покрытия.

На основе этого вывода был построен обширный ряд 3 D зависимостей, представленных ниже на рис. 5-12. Так на рис. 5 и 6 представлены графики зависимости потери массы от количества расхода порошка и расхода газа при дозвуковой и сверхзвуковой газопорошковой наплавке. Анализ графиков показывает, что в обоих случаях при увеличении расхода порошка и расхода газа, износостойкость наплавленного покрытия растет. Однако плоскость на рис. 6 более выпукла, что является демонстрацией факта, что износостойкость при сверхзвуковой газопорошковой наплавке, выше дозвуковой газопорошковой наплавки при тех же значениях параметров расхода газа и порошка.

Анализируя графики можно сделать вывод, что наименьшая потеря массы наблюдается при уменьшении скорости наплавки и увеличении дистанции. Либо в случае уменьшения дистанции наплавки и увеличения скорости.

Плоскости обеих графиков стремятся вверх при одновременном увеличении параметров дистанции и скорости, что говорит о плохой износостойкости покрытия при наплавке на таких режимах.

На рис. 9 и 10 представлены графики зависимости потери массы от параметров толщины и скорости наплавки, при дозвуковом (9) и сверхзвуковом (10) способах газопорошковой наплавки. Анализ графиков показал, что явно прослеживается следующая зависимость: при минимальных величинах скорости наплавки, по всей толщине покрытия, минимальна и потеря массы.

Как известно среди всех параметров в процессе сварки и наплавки наиболее информационно ёмким является термический цикл нагрева и охлаждения металла. Поэтому в соответствии с поставленной целью в работе были выполнены экспериментальные и теоретические исследования термоциклов.

В результате установлено, что при точечном нагреве сверхзвуковыми соплами поверхности пластины-образца до температуры «запотевания» на рациональных режимах, определённых с помощью 3 D зависимостей, были получены значения эффективной тепловой мощности q=1730…1790 Вт. Однако более важным выводом стало удовлетворительное совпадение расчётных и экспериментальных данных (рис. 13), что свидетельствует о достоверности полученных ранее результатов.

Дальнейшие экспериментальные исследования термоциклов нагрева стальных пластин сверхзвуковыми соплами с числами Маха М3, М4 и М5 (рис. 14) соответственно показали, что в последнем случае термический цикл существенно более жёсткий. Это, как известно, является показателем более концентрированных источников нагрева, что в свою очередь определяет возможность формирования более качественных покрытий в процессе наплавки. Также эти результаты подтвердили правомерность аналитического выбора критерия Маха, как наиболее явно выявляющего качественные характеристики металла, наплавленного сверхзвуковыми газопорошковыми струями.

На рис. 7 и 8 представлены графики зависимости потери от параметров дистанции и скорости наплавки, в процессах дозвуковой и сверхзвуковой газопорошковой наплавки.

Комплексный анализ построенных плоскостей, связывающих технологические параметры процесса СГП-наплавки и некоторые физико-механические характеристики наплавленных покрытий, а также сравнение численных значений параметров со значениями, полученными экспериментальным путём, показали следующее.

Совокупность разработанного алгоритма, аналитически выделенных критериев и факторов, наиболее заметно влияющих на качество наплавленных защитных покрытий и результатов экспериментального исследования, при удовлетворительном совпадении физического смысла и численных значений могут быть рассмотрены как методика прогнозирования качества покрытий, сформированных в новом технологическом процессе - наплавке сложнолегированных сплавов сверхзвуковыми газопорошковыми струями (рис. 15).

Ось	Параметр	Значения							
X	Расход порошка, кг/ч	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5
Y	Расход газа, м3/ч	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7
Z	Потеря массы m/s за время t, г/см²	0.079	0.151	0.22	0.281	0.337	0.39	0.451	0.521

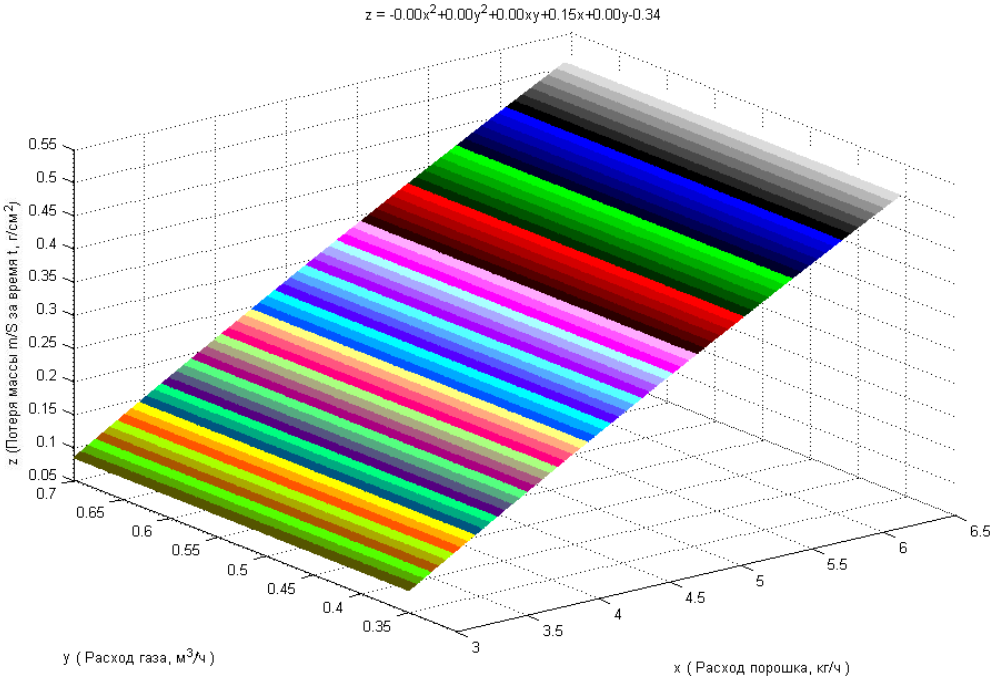


Рис. 5. Взаимосвязь показателей износостойкости, расхода горючего газа и расхода порошкового сплава в процессе дозвуковой газопорошковой наплавки

Ось	Параметр	Значения							
X	Расход порошка, кг/ч	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5
Y	Расход газа, м3/ч	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7
Z	Потеря массы m/s за время t, г/см²	0.051	0.161	0.264	0.295	0.309	0.379	0.418	0.477

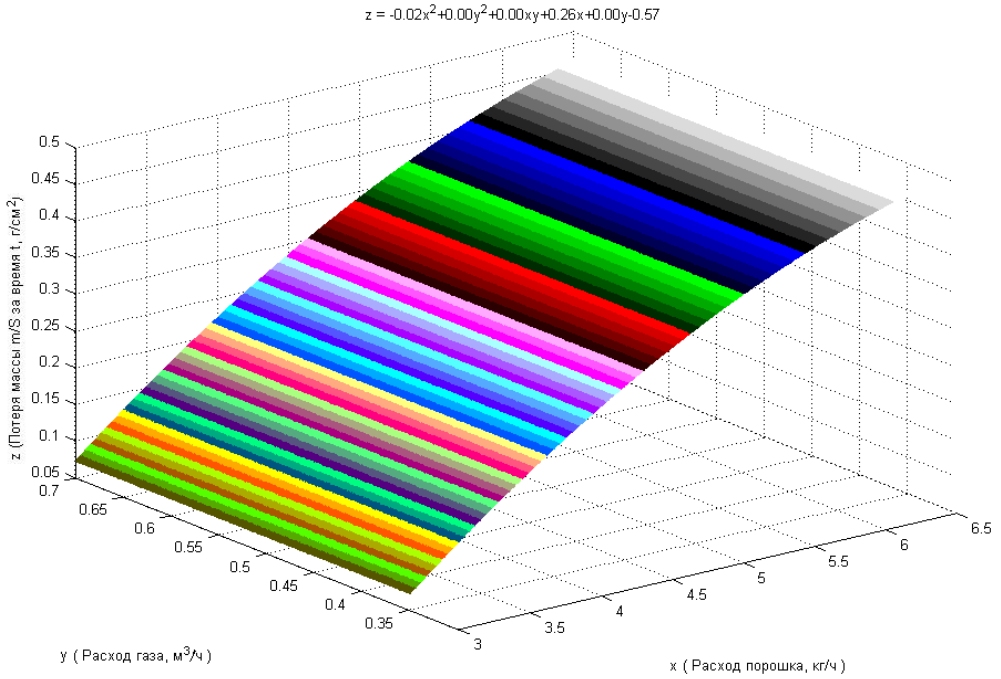


Рис. 6. Взаимосвязь показателей износостойкости, расхода горючего газа и расхода порошкового сплава в процессе сверхзвуковой газопорошковой наплавки

Ось	Параметр	Значения							
X	Скорость наплавки, мм/с	4	5	6	7	8	9	10	11
Y	Дистанция наплавки, мм	24	25	26	27	28	29	30	31
Z	Потеря массы m/s за время t, г/см²	0.079	0.151	0.22	0.281	0.337	0.39	0.451	0.521

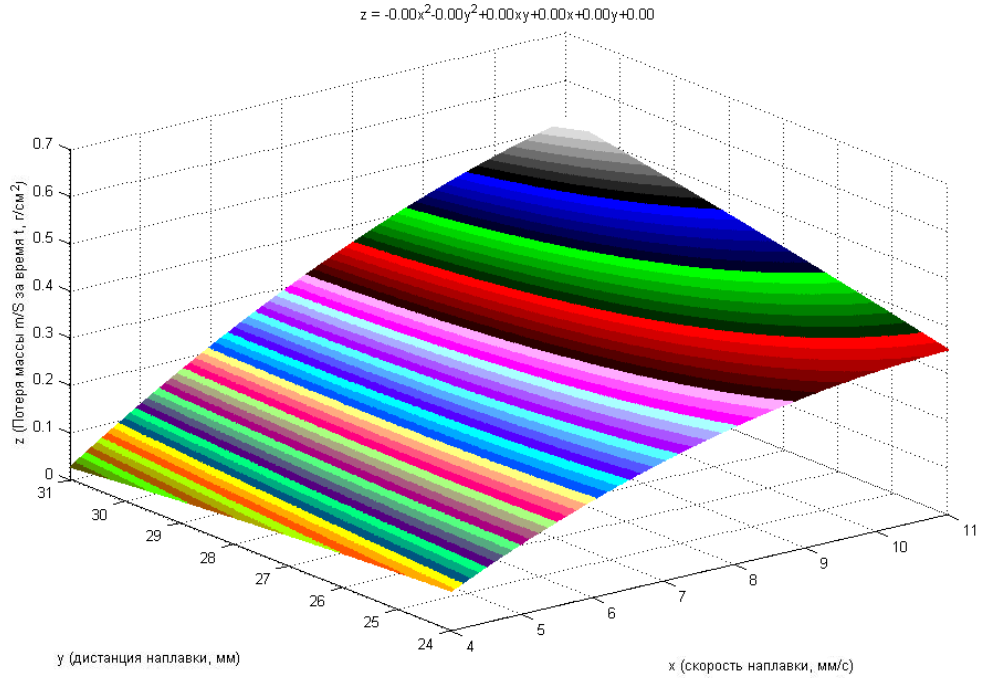


Рис. 7. Взаимосвязь показателей износостойкости, дистанции и скорости дозвуковой газопорошковой наплавки

Ось	Параметр	Значения							
X	Скорость наплавки, мм/с	4	5	6	7	8	9	10	11
Y	Дистанция наплавки, мм	24	25	26	27	28	29	30	31
Z	Потеря массы m/s за время t, г/см²	0.051	0.161	0.264	0.295	0.309	0.379	0.418	0.477

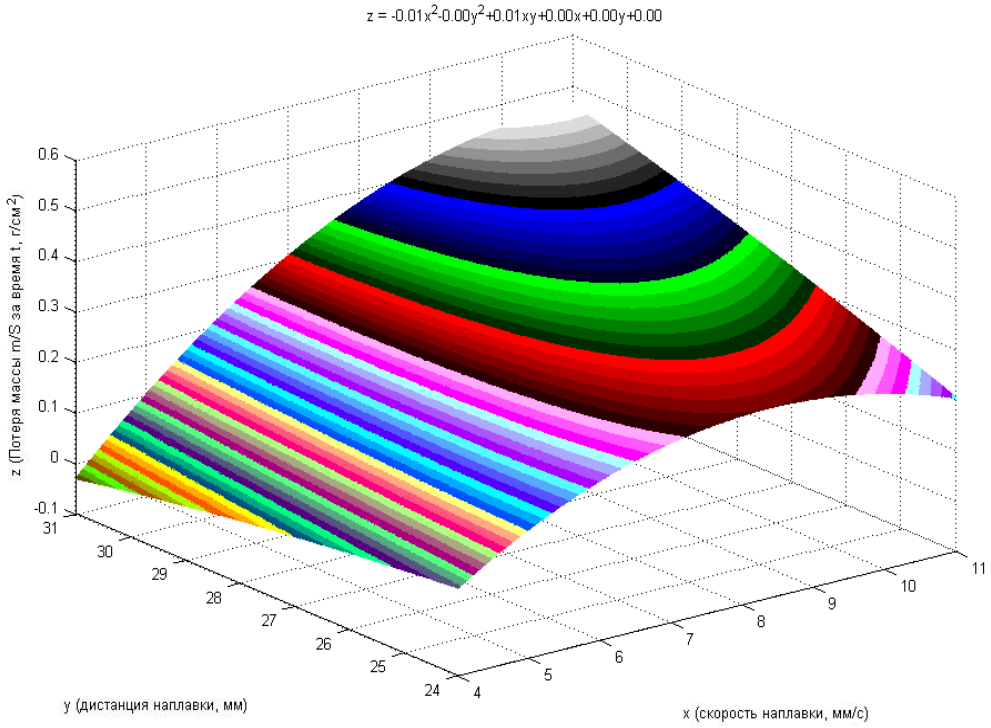


Рис. 8. Взаимосвязь показателей износостойкости, дистанции и скорости сверхзвуковой газопорошковой наплавки

Ось	Параметр	Значения							
X	Скорость наплавки, мм/с	4	5	6	7	8	9	10	11
Y	Толщина покрытия, мм	0.5	0.8	1.1	1.4	1.7	2	2.3	2.6
Z	Потеря массы m/s за время t, г/см²	0.079	0.151	0.22	0.281	0.337	0.39	0.451	0.521

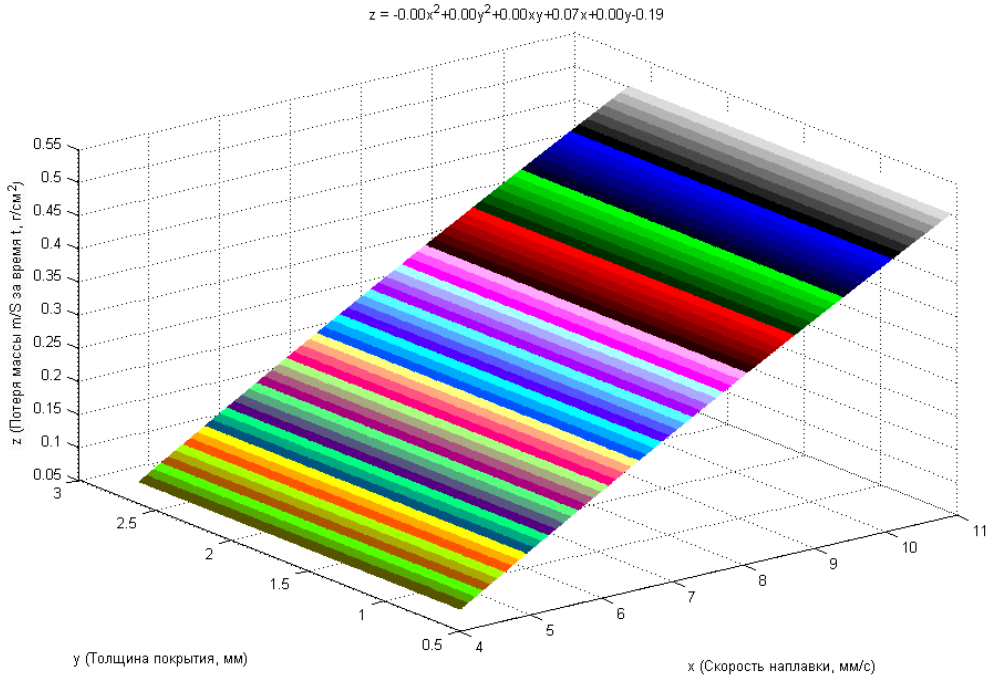


Рис. 9. Зависимость износостойкости покрытий от толщины и скорости наплавки при дозвуковом способе газопорошковой наплавки

Ось	Параметр	Значения							
X	Скорость наплавки, мм/с	4	5	6	7	8	9	10	11
Y	Толщина покрытия, мм	0.5	0.8	1.1	1.4	1.7	2	2.3	2.6
Z	Потеря массы m/s за время t, г/см²	0.051	0.161	0.264	0.295	0.309	0.379	0.418	0.477

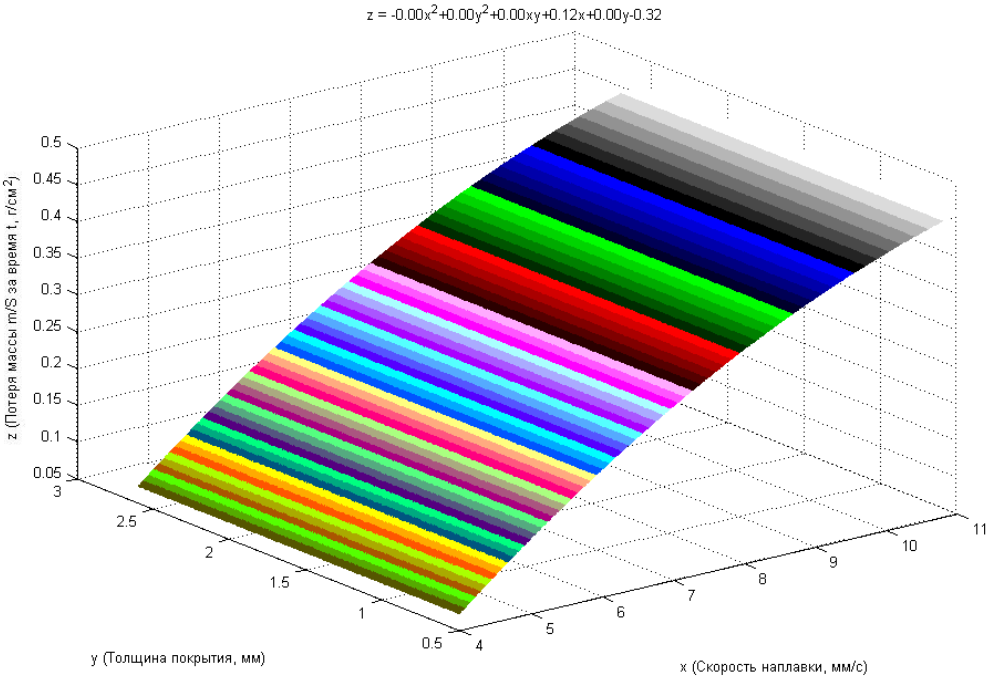


Рис. 10. Зависимость износостойкости покрытий от толщины и скорости наплавки, при сверхзвуковом способе газопорошковой наплавки

Ось	Параметр	Значения						
X	Расход порошка, кг/ч	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6
Y	Расход газа, м3/ч	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6	0.65
Z	Микротвердость, МПа	260	349	323	279	289	279	300

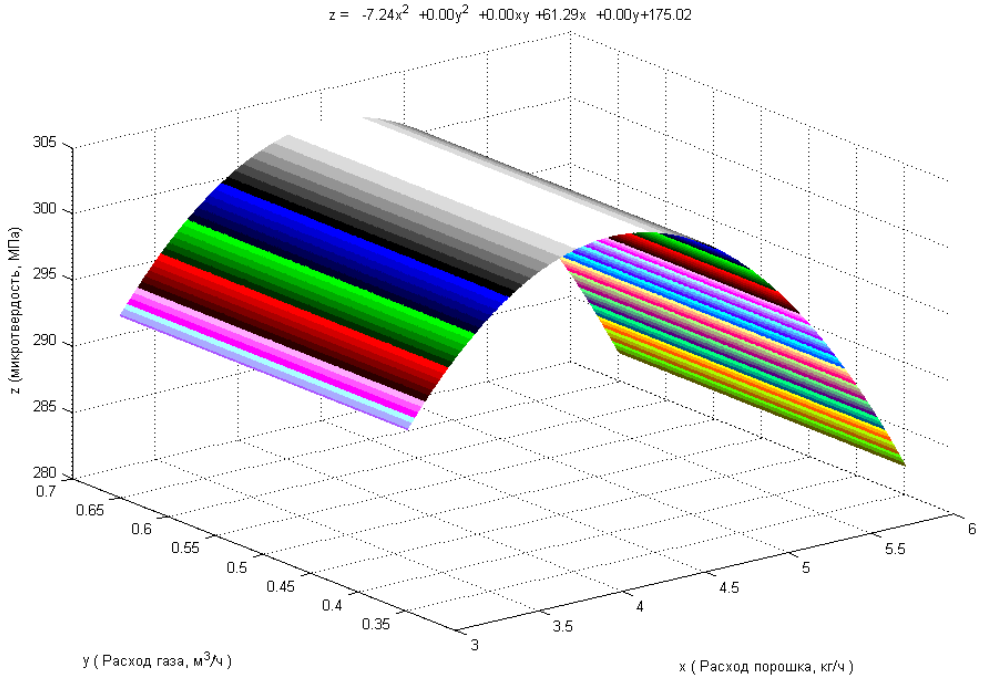


Рис. 11. Зависимость микротвердости от параметров расхода газа и порошка при дозвуковой газопорошковой наплавке

Ось	Параметр	Значения						
X	Расход порошка, кг/ч	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6
Y	Расход газа, м3/ч	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6	0.65
Z	Микротвердость, МПа	260	349	323	279	289	279	300

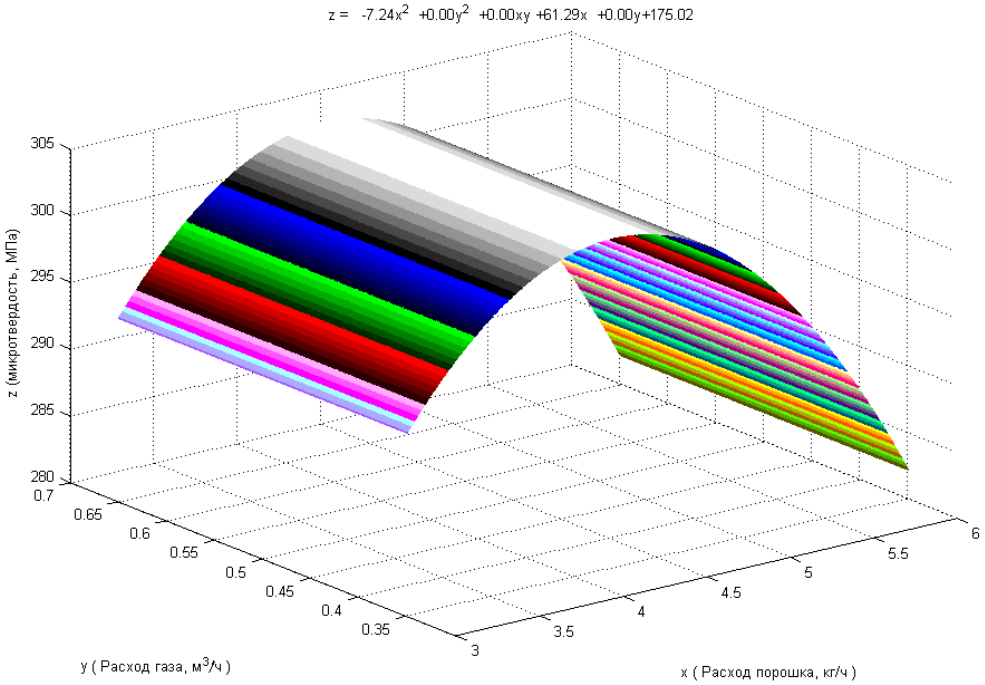


Рис. 12. Зависимости микротвердости от параметров расхода газа и порошка при сверхзвуковой газопорошковой наплавке

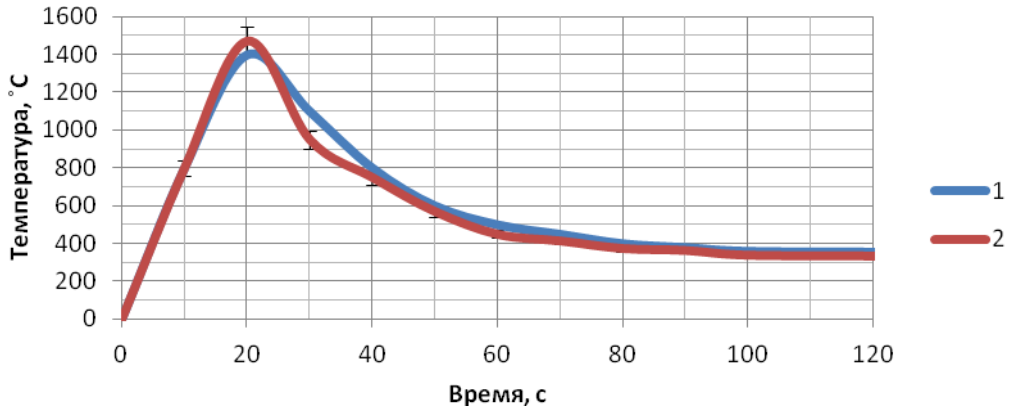


Рис. 13. Термоциклы, полученные при нагреве поверхности сверхзвуковым соплом М5 экспериментальным (1) и расчётным (2) методами

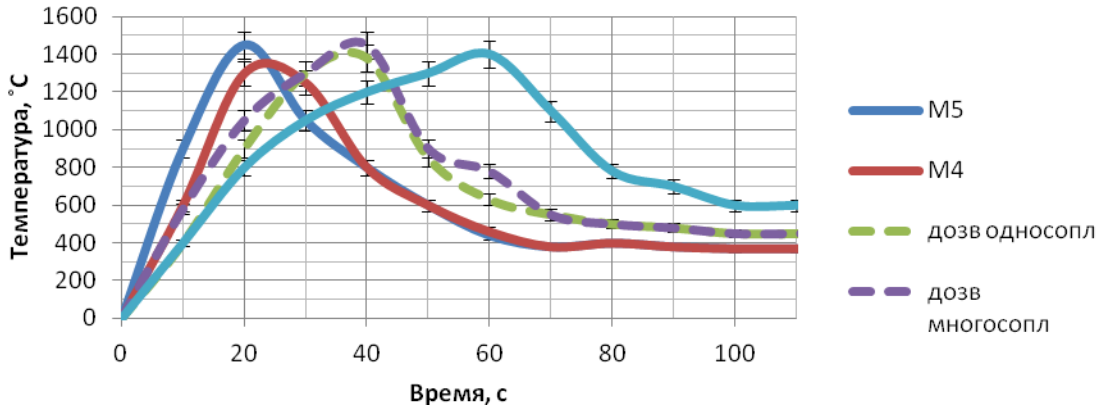


Рис. 14. Сравнение экспериментальных термоциклов, полученных при нагреве поверхности сталей сверхзвуковыми соплами с различными значениями критерии Маха

Комплексный анализ построенных плоскостей, связывающих технологические параметры процесса СГП-наплавки и некоторые физико-механические характеристики наплавленных покрытий, а также сравнение численных значений параметров со значениями, полученными экспериментальным путём, показали следующее.

Совокупность разработанного алгоритма, аналитически выделенных критериев и факторов, наиболее заметно влияющих на качество наплавленных защитных покрытий и результатов экспериментального исследования, при удовлетворительном совпадении физического смысла и численных значений могут быть рассмотрены как методика прогнозирования качества покрытий, сформированных в новом технологическом процессе - наплавке сложнолегированных сплавов сверхзвуковыми газопорошковыми струями (рис. 15).

В четвёртой главе приведён пример практического использования результатов диссертационной работы на предприятии ООО “НИЦ Бийскэнергомаш” в процессе опытно-экспериментальной наплавки износостойких сплавов системы Ni-Cr-B-Si на поверхность трубных панелей котлов с “кипящим слоем”.

Рис. 15. Методика прогнозирования качественных характеристик покрытий, наплавленных способом СГПН

Как показали результаты предварительных исследований, разработанная в диссертации методика прогнозирования качества покрытий, наплавляемых способом СГП-наплавки, позволяет с удовлетворительной степенью ожидания (погрешность ~10-12%) наплавлять износостойкие покрытия с показателями качества в 2-2,5 раза превышающими аналогичные показатели для процесса дозвуковой газопорошковой наплавки (рис.16).

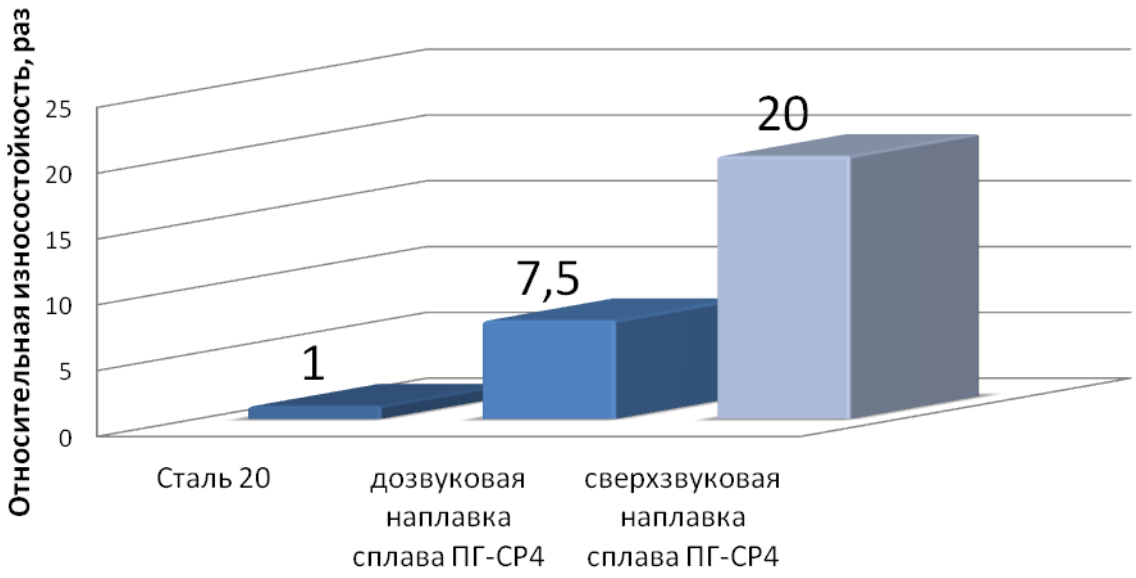


Рис.16. Относительная износостойкость наплавленных покрытий

Основные выводы и результаты

1. Разработан алгоритм формирования базы данных для прогнозирования параметров качества защитных покрытий, выполненных способом сверхзвуковой газопорошковой наплавки износостойких сплавов системы Ni-Cr-B-Si.

2. В результате анализа установлено, что среди множества безразмерных критериев, используемых в сварочном производстве, число Маха для газопорошковых струй в диапазоне М4-М5 наиболее приемлемо определяет способность формирования в процессе наплавки стабильных по внешнему виду наплавленных защитных покрытий. Это позволяет предполагать сохранение и повторяемость качественных характеристик наплавленных покрытий, в частности фазового состава по всему объёму наплавленного металла, а соответственно характеристик износостойкости, как искомой величины.
3. Сформирована структура основных факторов, определяющих качество покрытий, наплавляемых сверхзвуковым газопорошковым потоком.
4. Разработана методика прогнозирования качества наплавленных износостойких покрытий как совокупность разработанного алгоритма, аналитически выделенных критериев и факторов, наиболее заметно влияющих на качество наплавленных защитных покрытий и результатов экспериментального исследования, при удовлетворительном совпадении физического смысла и их численных значений.
5. Разработанная методика прошла удовлетворительную апробацию на образцах элементов котельного оборудования, в частности котлов с “кипящим слоем” с повышением показателей износостойкости в 2-2,5 раза с ожидаемым экономическим эффектом порядка 7,2 млн. рублей в год на одном котельном агрегате. Это позволяет рекомендовать её для использования в процессах наплавки применительно к ответственным устройствам Ростехнадзора.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНЫ В РАБОТАХ:

В изданиях по перечню ВАК:

1. Разработка программного продукта «Прогноз-техно» для исследования зависимости качества защитных покрытий от технологии их напыления / М. В. Радченко, Ю. О. Шевцов, С. А. Маньковский, **С. Г. Уварова** // Обработка металлов. – 2007.- № 4 (37). – С. 19-20.
2. Оптическая эмиссионная спектроскопия сверхзвуковых газовых струй в процессе наплавки защитных покрытий / М. В. Радченко, А. Я. Суранов, Ю. О. Шевцов, В. С. Киселев, В. С. Смолин, **С. Г. Уварова** // Ползуновский вестник /АлтГТУ им. И.И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2009. – № 1/2. – С. 279-284.
3. Комплексная диагностика режимов сверхзвуковой газопорошковой наплавки износостойких покрытий / М. В. Радченко, Ю. О. Шевцов, Т. Б. Радченко, В. С. Киселёв, В. Г. Радченко, **С. Г. Уварова** // Сварка и диагностика. – 2011. – №1. – С. 54-58.
4. Исследование термоциклов при сверхзвуковой газопорошковой наплавке износостойких покрытий / М. В. Радченко, В. П. Тимошенко, Т. Б. Радченко, В. С. Киселёв, В. Г. Радченко, **С. Г. Уварова** // Сварка и диагностика. – 2011. – № 2. – С. 29-32.

В других изданиях:

1. Спектральная диагностика сверхзвуковых газовых струй в процессах газопорошковой наплавки защитных покрытий / М. В. Радченко, В. С. Киселев, **С. Г. Уварова**, Ю. О. Шевцов, А. Я. Суранов // Ползуновский альманах / АлтГТУ им. И.И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2008. – № 3. – С. 73-76.
2. The comparative analysis of electron beam cladding in vacuum and gas flame powder cladding / M. V. Radchenko, I. S. Mihajlov, T. B Radchenko, **S. G. Uvarova** // 9 Int. Conf. on Electron beam techn. – Varna, 2009. – P. 73-78.
3. Прогнозирование свойств защитных покрытий с помощью программного продукта «Прогноз-техно» / М. В. Радченко, Ю. О. Шевцов, И. С. Михайлов, **С. Г. Уварова** // Ползуновский альманах / АлтГТУ им. И.И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2008. – № 3. – С. 149-151.
4. Технологические рекомендации по созданию защитных покрытий способом сверхзвуковой газопорошковой наплавки / М. В. Радченко, Ю. О. Шевцов, И. С. Михайлов, **С. Г. Уварова** // Ползуновский альманах / АлтГТУ им. И.И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2008. – № 3. – С. 183-185.
5. Диагностика параметров процесса сверхзвуковой газопорошковой наплавки защитных покрытий на опасных промышленных объектах / М. В. Радченко, А. Я. Суранов, **С. Г. Уварова**, В. С. Киселев // Наука и молодежь [Электронный ресурс] : 6-я Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Секция «Энергетика». Подсекция «Автоматизированный электропривод и электротехнологии» / АлтГТУ им. И.И. Ползунова. – Электрон. дан. – Барнаул, 2009. – Режим доступа: http://edu.secna.ru/publish/gorizonty_obrazovania/2009/n11/nim2009/etoe.doc. - Загл. с экрана.
6. Диагностика сверхзвуковых газовых струй в процессах газопорошковой наплавки защитных покрытий / М. В. Радченко, В. С. Киселёв, Ю. О. Шевцов, А. Я. Суранов, В. С. Смолин, **С. Г. Уварова** // Сварка и диагностика. – 2009. – № 2. – С. 31-36.
7. Анализ технологии газопорошковой наплавки и разработка рекомендаций по созданию защитных покрытий на изнашиваемых элементах котлоагрегатов с “кипящим слоем” / М. В. Радченко, Ю. О. Шевцов, В. Г. Радченко, И. С. Михайлов, **С. Г. Уварова** // Вестник Алтайского научного центра Сибирской академии наук высшей школы. – Барнаул : Изд-во АГУ, 2009. – № 9. – С. 75-81.

Подписано в печать 16.04.12г. Формат бумаги 60х84 1/16.
Печать - цифровая. Усл.п.л. 1,16.
Тираж 100 экз. Заказ 2012 – 242

Отпечатано в типографии АлтГТУ,
656038, г. Барнаул, пр-т Ленина, 46
тел.: (8–3852) 29–09–48

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