

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ НАПЫЛЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

Петров С.В.

АННОТАЦИЯ

Многокомпонентная химически активная плазма продуктов сгорания углеводородного газа с воздухом характеризуется комбинацией уникальных транспортных и теплофизических свойств. С технологической точки зрения это легкость регулирования окислительно-восстановительного потенциала, способность эффективно прогревать и ускорять дисперсные материалы, управлять параметрами стабилизированного электродугового разряда и др. Эти свойства стали ключевыми в развитии нового научно-технического направления и сделали привлекательным использование такой плазмы в технологии плазменного и электродугового напыления и обработки материалов. Доступность и дешевизна используемых плазмо - образующих газов делают особенно предпочтительным их применение с увеличением мощности установок, соответственно производительности процессов, и переходом к работе в диапазоне сверхзвуковых скоростей, когда рабочие параметры смещаются в область повышенных газовых расходов. В результате комплексных исследований (экспериментальных и на математических моделях) получены зависимости, связывающие принципы построения электродуговой аппаратуры, особенности процессов генерирования плазмы продуктов сгорания, ее взаимодействия с материалами и конечный технологический результат. В русле современных тенденций развит новый подход к созданию установок сверхзвукового плазменного порошкового и электродугового проволочного напыления, высокоскоростной поверхностной плазменной закалки. Он основан на использовании газоздушной смеси переменного состава и стабилизированной протяженной электрической дуги, горящей в плазмотроне, и адаптированной к технологическим требованиям. С использованием новой аппаратуры разработан и освоен ряд технологий: 1) нанесения защитных покрытий (алюмокерамическое покрытие для защиты труб конструкций и сооружений от почвенной, морской и атмосферной коррозии, износостойких покрытий в условиях сухого и граничного трения, каталитических покрытий для нейтрализации отходящих автомобильных газов, термобарьерных и других покрытий), 2) высокоскоростного поверхностного упрочнения тяжело нагруженных деталей на примере упрочнения гребней колесных пар тягового и подвижного состава.

Достигнутый высокий уровень с кратным улучшением основных показателей процессов и качества напыления и поверхностного упрочнения с апробацией в широких промышленных масштабах свидетельствует о состоявшейся материальной базе для решения сложных технологических задач.

ВВЕДЕНИЕ

Перевод экономики на путь интенсивного развития предполагает активное использование концентрированных, в том числе плазменных, источников энергии, разработку на их основе высокоэффективных технологий, способствующих повышению надежности и долговечности машин и механизмов при экономии металлов.

Процессы обработки с использованием плазменного нагрева разработаны относительно недавно, однако они вышли далеко за стадию исследований. За последние годы, наряду с тенденцией к промышленному применению плазменных процессов, значительно возрос объем технологических исследований. Это обусловлено рядом свойств низкотемпературной плазмы, использование которых позволяет значительно повысить эффективность известных процессов и создать новые.

Среди технологий инженерии поверхности газотермическое напыление (ГТН) защитных покрытий интенсивно развивается и особенно хорошо удовлетворяет возрастающим

требованиям промышленности. В последние годы успешное развитие получает также процесс плазменной поверхностной закалки.

Газотермическое напыление защитных покрытий относится к числу относительно молодых, прогрессивно развивающихся технологий. Среди методов газотермического напыления покрытий наиболее универсальным является плазменный.

Существенная роль в промышленной реализации этой технологии принадлежит оборудованию, основным элементом которого, “сердцем”, являются генераторы потока плазмы. Можно сказать, что при прочих равных условиях, например, роду напыляемого материала и типу упрочняемых деталей, основные шаги в улучшении качества покрытий соответствовали созданию нового типа оборудования - от простейших дуговых металлаторов и ацетилен-кислородных горелок через промежуточные этапы - дозвуковые плазмотроны, установки динамического вакуума - к сверхзвуковым плазмотронам, металлаторам и реактивным горелочным устройствам.

В практике плазменного напыления покрытий в качестве плазмо образующих сред традиционно применяют аргон, аргон с добавкой до 25% об. водорода, азота, сложные смеси аргона, азота и водорода, в редких случаях смеси инертных газов, содержащих гелий.

От выбора плазмо образующей среды зависят электрическая мощность установки, требуемые динамические свойства системы электропитания, температура и скорость плазмы, ее способность переносить тепло и импульс к напыляемому материалу и вступить с ним в химические реакции, а также конструкция плазмотрона.

Начало 80-х годов характеризовалось пересмотром специалистами практиками технологически развитых стран взглядов на газотермическое напыление, резким ростом объема производства деталей с покрытиями, значительным расширением их номенклатуры. Этот период также характеризуется появлением множества фирм, специализирующихся на газотермических покрытиях и успешным их развитием. Такое ускорение развития технологии ГТН обусловлено переходом к высокоскоростным методам напыления. В хронологической последовательности это детонационное, высокоэнергетическое плазменное Metco-8M, газопламенное сверхзвуковое HVOF, а с конца 80-х годов - плазменное сверхзвуковое “Plazjet”. Сверхзвуковое плазменное напыление “Plazjet” характеризуется наивысшей производительностью и наилучшим качеством покрытий, полученных напылением в открытой атмосфере.

Особое место среди плазменных процессов обработки материалов занимают развиваемые авторами процессы с использованием плазмы продуктов сгорания воздуха с горючим углеводородным газом. Благодаря ряду уникальных свойств такой плазмы: высокие теплоемкость и теплопроводность, легкость регулирования окислительно-восстановительного потенциала, недефицитность и малая относительная стоимость - процессы на ее основе все в большей степени привлекают интерес исследователей и промышленности.

Дороговизна и дефицитность инертных плазмо -образующих газов обуславливали трудности практической реализации и сужали географию использования процессов плазменного напыления в целом. Это обстоятельство явилось одним из основных факторов успешного развития в бывшем СССР процесса плазменного напыления с использованием в качестве плазмо -образующего газа смеси воздуха с горючим углеводородным газом (метаном, пропан-бутаном).

Экономичность и техническая целесообразность применения газоздушных смесей особенно проявляется с увеличением мощности плазмотрона и переходом к сверхзвуковым скоростям, когда оптимальные режимы смещаются в область больших расходов плазмо -образующего газа и снижаются времена контакта частиц с окружающей атмосферой.

Решающее влияние на развитие процессов с использованием плазмы продуктов сгорания оказали разрабатываемые в Институте газа НАН Украины и ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины научно-технические основы повышения эффективности использования природного газа в высокотемпературных процессах. К числу наиболее важных следует

отнести полученные данные по термодинамическому равновесию системы С-Н-О в широком интервале изменения исходных параметров, учету влияния диффузии на протекание высокотемпературных процессов химической переработки газа, расчету и конструированию различных топливно-плазменных устройств. В результате этих работ определилась благоприятная перспектива промышленного применения топливно-дуговых горелок, основанная на таких факторах: 1) возможность регулирования в широких пределах окислительно-восстановительного потенциала плазмы путем изменения соотношения топливо:окислитель; 2) высокая энтальпия плазмы при одинаковой электрической мощности плазматрона; 3) относительная экономичность, обусловленная непосредственным использованием химической энергии топлива в плазменном факеле и недефицитность плазмо образующих газов; 4) высокие транспортные свойства плазмы вследствие протекания в ней диссоциативно-рекомбинационных процессов.

НОВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПЛАЗМЕННОГО И ЭЛЕКТРОДУГОВОГО НАПЫЛЕНИЯ

Основные этапы в совершенствовании аппаратуры главным образом связаны с разработкой и реализацией новых подходов, а в последние годы с ее оснащением измерительными и управляющими цифровыми устройствами. На базе этой идеологии разработан и освоен выпуск ряда новых типов наукоемкой плазменной аппаратуры, реализованы новые технологии.

Институтом газа НАН Украины и ИЭС им. Е.О.Патона НАН Украины разработана и подготовлена к промышленной реализации новая аппаратура сверхзвукового высокопроизводительного плазменного напыления мощностью 160 кВт "КИЕВ-С". Выполненный большой объем сравнительных испытаний показал, что эта аппаратура обеспечивает наилучшее качество газотермических покрытий, экономична, надежна и доступна для широкого потребителя.

В развитие этой идеи разработан ряд сверхзвуковых плазматронов и аппаратурных комплектов для напыления покрытий в плазме продуктов сгорания углеводородного газа с воздухом мощностью 10-40-80-160 кВт. В этих плазматронах реализован новый подход формирования протяженной слабонедорасширенной сверхзвуковой плазменной струи. Пониженное рассеивание мощности струи обеспечивается за счет подавления турбулентности в пограничном слое. Это достигнуто за счёт использования тонких эффектов динамики плазмы. Основные особенности поведения плазмы молекулярного газа в неравновесных условиях связаны с колебательно-поступательной неравновесностью, которая может достигать нескольких тысяч градусов. В такой ситуации возможны условия, когда эффект второй вязкости обращается (вторая или объемная вязкость становится отрицательной). Это приводит не к затуханию звука, генерируемого собственной турбулентностью, а к его нарастанию. Эффективное усиление звука за счет обращения второй вязкости происходит на частотах 10 - 100 кГц. Интенсивные звуковые волны, которые возникают и усиливаются на одном участке течения, а поглощаются на другом (ниже по потоку), могут значительно повлиять на гидродинамические параметры течения и электрофизические свойства разряда. Генерируемая при этом сверхзвуковая плазменная струя характеризуется более (на 30%) высокими разгонной и греющей способностями. При скорости частиц порядка 600 м/с обеспечивается проплавление всех тугоплавких материалов.

Переход к сверхзвуковой скорости истечения плазменной струи приводит к повышению эффективности разгона напыляемых частиц и снижению интенсивности нагрева. Поскольку за формирование покрытия отвечает кинетическая энергия частиц, то увеличение их скорости в момент встречи с основой в 3 - 4 раза даст повышение кинетической энергии в 9 - 16 раз. Именно здесь происходит качественный скачок в улучшении всех служебных свойств напылённых покрытий. Чтобы обеспечить достаточную греющую способность сверхзвуковой струи в качестве плазмообразующего

газа, используется высокоэнтальпийная смесь воздуха с метаном и формируется струя плазмы с пролонгированным начальным участком. Кроме того, сверхзвуковая плазменная струя является удобным для практического использования объектом. Она характеризуется видимой волновой структурой. Износ электродов плазмотрона, изменение режима его работы отражаются на геометрии и взаимном расположении скачков уплотнения. Оператор в любой момент может определить отклонения от заданного режима и принять меры к устранению. Наглядное и простое обеспечение постоянства выбранных параметров струи во время напыления гарантирует воспроизводимость технологии и повторяемость всех свойств покрытий.

Применение установок сверхзвукового плазменного напыления целесообразно во всех случаях, когда возникает необходимость в высокой производительности и высококачественных покрытиях. Исключение высококислых инертных газов делает этот процесс экономичным и доступным. Наиболее высокий на сегодняшний день уровень качества покрытий получен с использованием сверхзвукового плазменного напыления. Здесь следует отметить, что установка сверхзвукового плазменного напыления (работающая на смеси воздуха с метаном) разрабатывалась параллельно с известной системой Plazjet американской фирмой Praxair-TAFA (работающей на смеси азота с водородом). По техническим характеристикам и свойствам получаемых покрытий эти разработки практически совпадают. Улучшение свойств покрытия по мере совершенствования аппаратуры можно проследить по параметрам пористости и микротвердости. Они коррелируют с прочностью и износостойкостью. Зависимости микротвердости и пористости покрытия WC-12Co от способа напыления приведены в таблице :

	Газопламенное	Плазменное дозвуковое	Детонационное	Плазменное сверхзвуковое
Н _ц , МПа	200-400	500-550	540-600	700-800
П, %	6-12	3-6	1-3	0,5-1

Принцип построения сверхзвуковых плазмотронов с одиночной межэлектродной вставкой приведен на Рис.1.

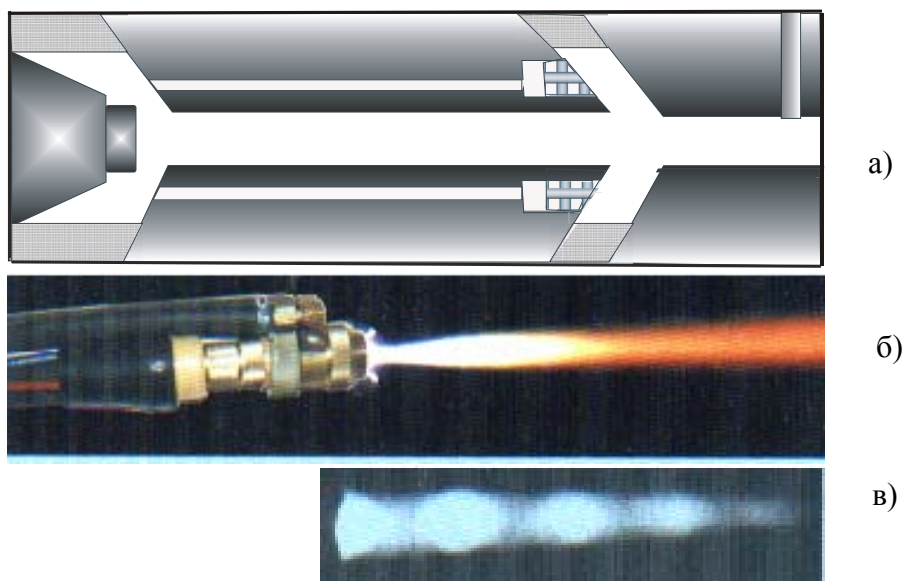


Рис. 1. Сверхзвуковой плазмотрон для напыления покрытий
а) – схема плазмотрона, б) – плазмотрон в работе, г) – волновая структура сверхзвуковой плазменной струи

Конфигурация установки сверхзвукового плазменного напыления ПЛАЗЕР 40 приведена на Рис.2.

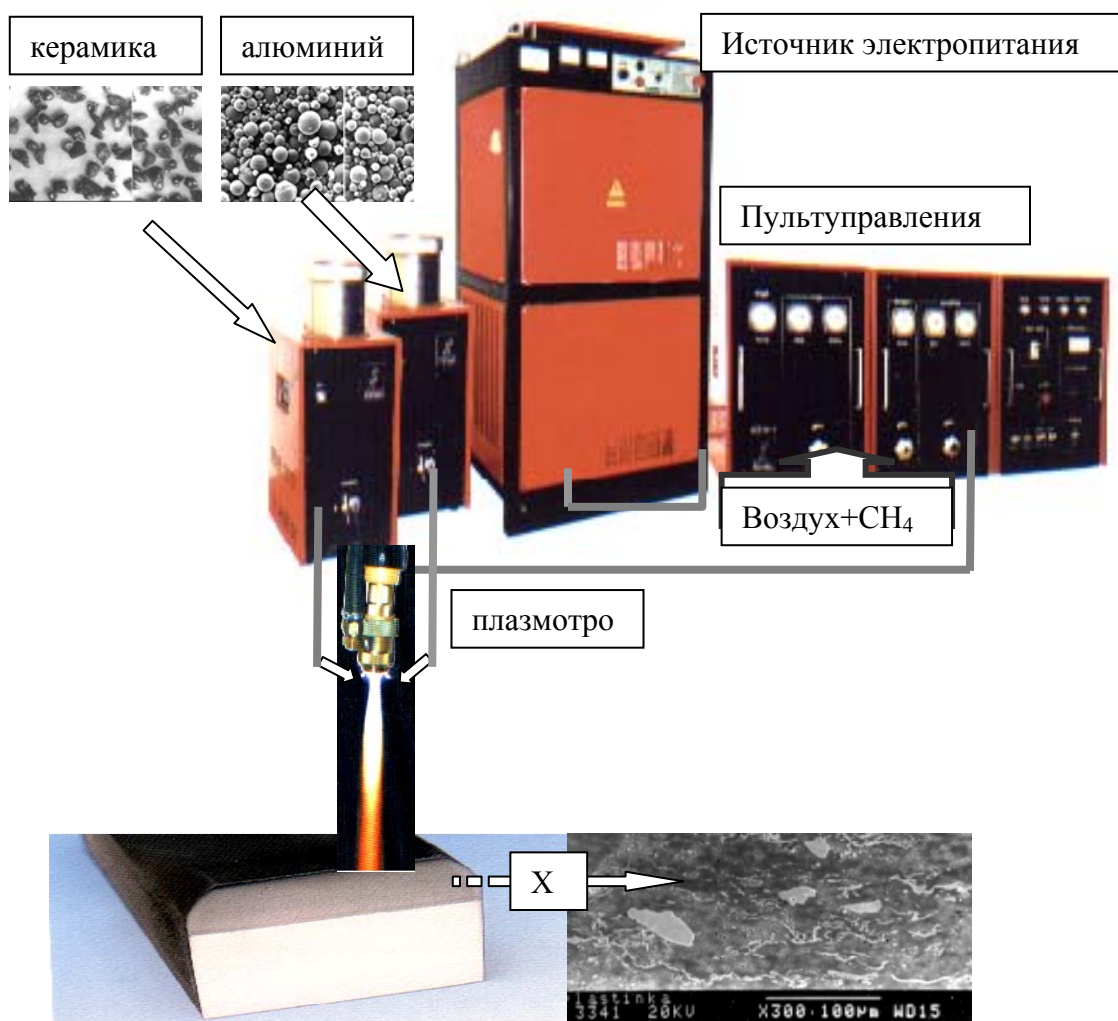


Рис.2. Конфигурация установки сверхзвукового плазменного напыления ПЛАЗЕР 40.

АППАРАТУРА ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ, ПОСТРОЕННАЯ НА УНИФИЦИРОВАННОЙ БЛОЧНО-МОДУЛЬНОЙ ОСНОВЕ ПЛАЗЕР-40

Установка плазменного напыления мощностью 40 кВт комплектуется плазматронами в ручном и машинном исполнениях. Предназначена для напыления покрытий на наружные и внутренние поверхности. Могут использоваться порошковые и проволочные материалы. Плазматрон выполнен с одиночной межэлектродной вставкой и рекуперативным охлаждением, может работать на дозвуковом и сверхзвуковом режимах.

- Плазмо образующий газ: воздух + метан
- Напряжение сети (х.х.) 3x380 В (180 В)
- Рабочее напряжение 140-180 В
- Рабочий ток 100-250 А
- Расход смеси 3-10 м³/ч
- К.п.д. плазматрона 90 %
- Производительность напыления: металлы 10 кг/ч

керамика (Al₂O₃)

5 кг/ч

ПЛАЗЕР-80

Установка плазменного напыления с плазмотроном мощностью 80 кВт, отдельной (или общей по желанию заказчика) подачей газов, в машинном исполнении и предназначена для эксплуатации в составе автоматизированных и механизированных комплексов.

- Плазмо образующий газ: воздух + метан (пропан-бутан)
- Напряжение сети (х.х.) 3х380 В (300 В)
- Рабочее напряжение 200-270 В
- Рабочий ток 100-300 А
- К.п.д. плазмотрона 70 %
- Производительность напыления:
 - металлы 25 кг/ч
 - керамика (Al₂O₃) 10 кг/ч

ПЛАЗЕР-180

Установка плазменного напыления с плазмотроном мощностью 180 кВт в машинном исполнении, работающем на сверхзвуковом и дозвуковом режимах. Предназначена для эксплуатации в составе автоматизированных и механизированных комплексов и может быть использована во всех случаях, где необходимо получить высококачественные покрытия при высокой производительности.

- Плазмо образующий газ: воздух + метан
- Напряжение сети (Х.Х.) 3х380 (500) В
- Рабочее напряжение 250-450 В
- Рабочий ток 200-400 А
- Расход смеси 10-30 м³/ч
- К.п.д. плазмотрона 70 %
- Производительность напыления:
 - металлы 50 кг/ч
 - керамика (Al₂O₃) 15 кг/ч

АППАРАТУРА СВЕРХЗВУКОВОЙ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ ПЛАЗЕР – СМ1

Предназначена для электродугового распыления проволочных материалов в сверхзвуковом потоке горячих продуктов сгорания воздуха с метаном. Установка состоит из блока металлатора со встроенной сверхзвуковой горелкой, пульта управления, механизмов подачи проволоки, источника питания дуги. Выполнена в машинном и в ручном исполнении.

Предназначена для работы в составе автоматизированных и механизированных комплексов.

- Напряжение сети 3х380 В
- Рабочее напряжение 35-45 В
- Рабочий ток 150-400 А
- Расход смеси 30-40 м³/ч
- Производительность напыления стальной проволоки 8-20 кг/ч
- Диаметр распыляемой проволоки 1,2-2,2 мм

ТЕХНОЛОГИИ СВЕРХЗВУКОВОГО НАПЫЛЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

Алюмокерамическая защита от коррозии.

Газотермические покрытия, полученные с применением традиционного оборудования, при использовании для предотвращения коррозии имеют три недостатка. Прежде всего, это высокая окисленность материала, которая может достигать 30 - 60 %. Вторая проблема - это пористость покрытия, которая составляет 10 – 20 %. Третья – деградация материала покрытия в процессе напыления: химсостав покрытия не соответствует химсоставу напыляемых материалов. По сути усилия разработчиков аппаратуры и технологий напыления в течение последних десятилетий направлялись на преодоление указанных недостатков.

Нами практически эти недостатки преодолены. В качестве сырья могут использоваться как порошковые материалы (механическая смесь алюминия и керамики), так и порошковые проволоки (в алюминиевой оболочке керамический порошковый сердечник). Аппаратура, в первом случае - это установки плазменного сверхзвукового напыления (рабочий газ - смесь воздуха с метаном), во втором случае - это установки сверхзвуковой электродуговой металлизации (рабочий газ – смесь воздуха с метаном). Оба варианта обеспечивают высокую производительность (до 50 м²/час) при незначительных текущих затратах (стоимость покрытия составляет 2-3 стоимости израсходованного алюминия). Удельные расходы составляют 1 - 3 кВт·ч/ м². Качество покрытий, полученных сверхзвуковым напылением, значительно улучшается. Пористость снижается до 0,5 – 2, окисленность до 2 – 5 %, прочность сцепления повышается до 35 МПа [8]. Такое улучшение качества покрытий объясняется, в основном, более высокой скоростью полета дисперсных частиц. В табл.2 приведены сравнительные данные параметров процесса электродугового напыления алюминиевой проволоки с использованием лучшей системы фирмы TAFA (США) model 8860 и сверхзвукового электродугового напыления в продуктах сгорания.

Таблица 1.

	Рабочий газ	Скор. газа м/сек	Скор. частиц м/сек	Темпер. частиц °С	Порист. покрытия %	Прочн. сцепл. МПа	Окисл. покр. %
TAFA model 8860	Воздух	400	160	2056	5	25	10
Сверхзвук. электродуг. напыление	Продукты сгорания	1200	350	2004	1	35	4

Первоначально алюмокерамическое покрытие разрабатывалось для защиты корпусов ледоколов, нефтяных платформ и других изделий, которые эксплуатируются в сильно и слабо агрессивных средах и растворах солей. Оно должно было, наряду с обеспечением коррозионной стойкости, обладать высокими механическими характеристиками – износостойкостью, способностью сохранять свои свойства при гибке и холодной штамповке изделия, эффективно защищать сварные швы и в течение всего периода эксплуатации сохранять защитные и декоративные свойства.

Именно такие свойства получены в процессе обработки материала покрытия и технологии его нанесения, они подтверждены более чем 10 летней промышленной эксплуатацией изделий – трубопроводов различного назначения.

В алюмокерамическом покрытии под действием влаги в первые 2-3 месяца эксплуатации стимулируется образование нерастворимого осадка. Этот осадок плотно закупоривает микропоры, шероховатости и герметизирует покрытие, предотвращая доступ агрессивной среды к металлу основы. После этого все электрохимические процессы останавливаются и система изолирующее покрытие – чёрный металл будет находиться в состоянии такого равновесия до какого-то изменения внешних условий. Это могут быть механические разрушения покрытия, изменение химического состава внешней агрессивной среды, изменение полярности приложенных потенциалов и т.д. После указанных изменений система алюмокерамическое покрытие - чёрный металл основы снова перестроится. Таким образом, покрытие работает как протекторное только в начальный период эксплуатации и некоторое время после изменения внешних условий, поэтому оно получило название протекторное пассивирующееся. Покрытие является «самозалечивающимся», поскольку самостоятельно ликвидирует несплошности, участки повреждения и частичного отслоения.

Такое покрытие конкурирует и по своим эксплуатационным характеристикам превосходит лакокрасочные, гальванические покрытия, покрытия, получаемые окунанием в расплав, стеклоэмалевые, битумные, битумно-резиновые, полимерные и эпоксидные.

Опыт многолетней эксплуатации при прокладке технологических трубопроводов показал, что освоен новый промышленный процесс нанесения высококачественного уникального антикоррозионного покрытия с повышенными механическими свойствами: по износостойкости в 8 –10 раз превышает аналогичные алюминиевые, благодаря наличию в его составе керамики. Это особенно важно для защиты скрытых элементов стальных конструкций, подверженных эрозионному воздействию – вода + песок, смещение грунта и т.д. Стальные листы с покрытием поддаются холодной штамповке, прокатке без ухудшения защитных свойств покрытия.

Алюмокерамическое покрытие, полученное сверхзвуковым плазменным или электродуговым напылением (Рис.3), сегодня не имеет конкуренции в координатах цена – защитные свойства. Наиболее эффективно по стоимости его использование при строительстве новых мостов и сооружений. Применение такого покрытия особенно актуально для защиты от коррозии закладных элементов стальных конструкций, отвечающих за безопасность и доступ к которым ограничен.



а



б

Рис.3. Напыление алюмокерамического покрытия на трубы (а), накопитель труб с алюмокерамическим покрытием (б)

Газотермические покрытия в упрочнении деталей мощных дизелей.

Разработка, производство и эксплуатация мощных дизелей постоянно сопровождаются поиском путей повышения КПД, снижения затрат, использования доступных и дешевых материалов, облегчения, ускорения и повышения гибкости ремонта. Наиболее значимыми для надежной работы дизеля узлами являются цилиндро-поршневая группа и коленвал-вкладыш, а важнейшую роль в этом играет правильный выбор материалов сопряжения трущихся пар. Поскольку допустимая величина износа рабочих поверхностей этих деталей составляет всего десятые доли миллиметра, то в последние годы активно развивается новый подход к их конструированию – на дешевое и массивное основание наносить дорогое и эффективное покрытие.

Полезь от реализации высокой технологии плазменного напыления заключается в повышении времени жизни и экономичности двигателя за счет снижения износа, коэффициента трения и защиты от коррозии. Кроме того, весь блок цилиндров становится более дешевым, компактным. Освоен выпуск модернизированных двухслойных втулок цилиндров повышенной износостойкости для тепловозных и речных дизелей и восстановление с упрочнением локомотивных коленвалов.

Газотермические защитные покрытия на деталях цилиндропоршневой группы (ЦПГ), элементах камеры сгорания (Рис.4) и коленвал-вкладыш позволяют в 3 - 4 раза уменьшить износ, увеличить время их жизни практически до выработки запаса усталостной прочности материала, улучшить технические характеристики двигателя (снизить расход топлива и масла, количество вредных выбросов, повысить мощность) и получить значительную экономию. Плазменная и электродуговая технологии хорошо вписывается в современные тенденции развития двигателестроения, связанные с ростом удельных мощностей дизелей за счет форсирования среднего эффективного давления в цилиндрах и направленные на повышение топливной экономичности двигателя. Как следствие форсирование приводит к увеличению механической и тепловой напряженности деталей дизеля. При этом вопросы долговечности и надежности дизеля, определяемые в целом по отдельным его деталям и в первую очередь по работоспособности пар трения цилиндровой втулки-кольцо, коленвал-вкладыш обостряются.

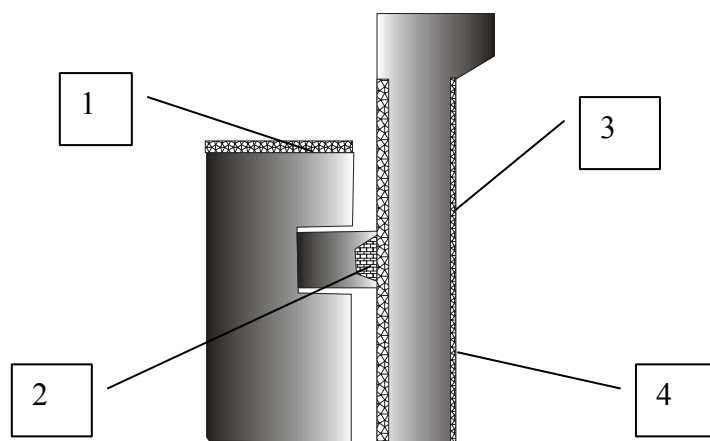


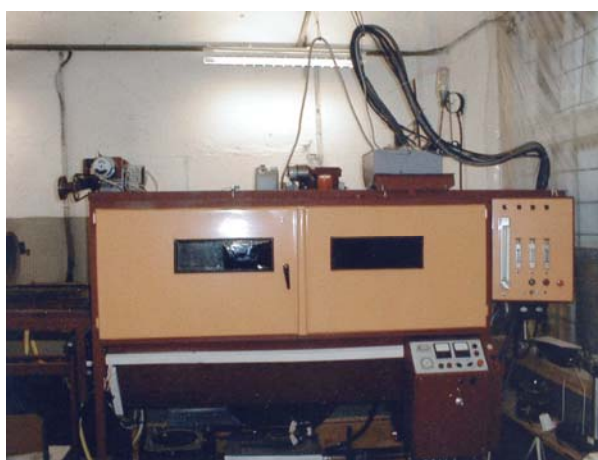
Рис.4. Плазменные защитные покрытия на деталях цилиндропоршневой группы

1 – термобарьерное каталитическое покрытие поршня, 2 – износостойкое покрытие поршневого кольца; 3 – кавитационностойкое покрытие наружной поверхности втулки цилиндра; 4 - износостойкое, задиростойкое, термобарьерное покрытие внутренней поверхности втулки цилиндра.

Опыт промышленной эксплуатации (более трех лет на локомотивах с пробегом более 500 тысяч км и пяти тысяч часов на речных дизелях подтверждает выполненные исследования. Износ втулок на речном дизеле - за навигацию 2003 года составил 0,02 мм против 0,08 по нормативу для данного дизеля. На основании полученных результатов введено в эксплуатацию технологическое оборудование в различных исполнениях (Рис.5), которое позволяет из отработавших свой срок по износу внутренней поверхности чугунных втулок изготавливать практически новые и более износостойкие. Процесс полностью автоматизирован, блок управления на Рис.6. Только за 2003 год было выпущено более 600 единиц продукции по данной технологии, 2004 год – более 1000.



а



б

Рис.5. Полуавтомат для напыления покрытия на зеркало цилиндра мощных (локомотивных, судовых) дизелей; а – вертикальное размещение гильзы, б – горизонтальное размещение гильзы.



Рис.6. Блок управления полуавтоматом

Проблема качественного восстановления тяжело нагруженных коленчатых валов мощных дизелей (локомотивных, судовых) является чрезвычайно актуальной. В основном это связано с их высокими стоимостью и требованием надёжности. На сегодняшний день проблема восстановления таких коленвалов решена с использованием технологии и аппаратуры сверхзвуковой электродуговой металлизации. Среди способов сверхзвукового газотермического напыления наиболее энергетически выгодным является электродуговая металлизация. С переходом на сверхзвуковой режим работы были преодолены основные недостатки электродугового напыления, связанные с низким качеством покрытий – повышенное выгорание легирующих элементов распыляемого металла проволок под действием струи воздуха, низкая прочность покрытия и высокий коэффициент трения между покрытием и вкладышем.

Скачок в повышении качества покрытий до уровня, обеспечивающего достаточный запас эксплуатационной надёжности, достигнут благодаря двум новшествам:

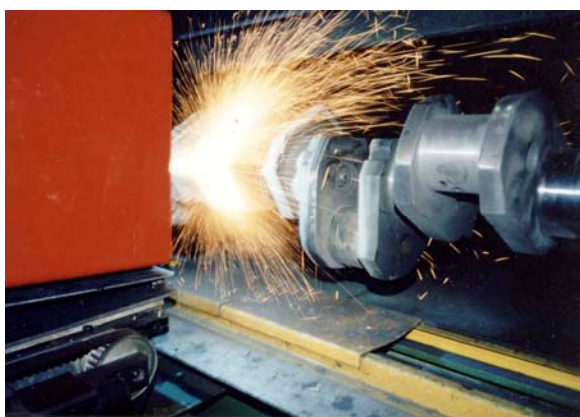
- использованию в качестве распыляющего газа сверхзвукового потока горячих продуктов сгорания метана с воздухом;
- использованию для напыления специальной порошковой проволоки.

В этом случае кинетическая энергия напыляемых частиц повышается в 4-5 раз, скорость их полета возрастает с 70-150 м/с до 250-300 м/с. Снижение времени контакта расплавленных капель с атмосферой во время полёта до основы плюс пониженная концентрация кислорода в окружающей струе продуктов сгорания обеспечивают более полное сохранение углерода и легирующих элементов в покрытии. В сравнении с типовым процессом электродугового напыления степень выгорания углерода падает с 40-60 % до 3-6 %, а кремния и марганца с 20-25 % до 2-3 %. Технология сверхзвуковой электродуговой металлизации позволила получить композиционные покрытия из порошковой проволоки с достаточно большим (двухкратным) запасом прочности. Прочность сцепления покрытия с основой возрастает с 20-40 МПа до 55-80 МПа, пористость снижается с 8-15% до 0-3 %, микротвёрдость повышается на 40-60% в результате высокоскоростной закалки из жидкого состояния. Отличительной особенностью таких покрытий является однородная ламелеобразная структура (Рис. 9), Низкая пористость предотвращает усадку покрытия при эксплуатации деталей. При относительно невысокой средней твердости покрытия (28 – 38 HRC) микротвердость структурных составляющих достигает 900 – 950 кгс/мм². В покрытии формируются остаточные напряжения сжатия, они затрудняют образование трещин, увеличивают сопротивление усталости деталей и повышают износостойкость материала. Все вместе это обеспечивает высокие триботехнические характеристики, антизадирные свойства и низкий коэффициент трения во всем рабочем диапазоне нагрузок. Он составляет 0,02-0,03, что соответствует “жидкостному” или граничному трению с минимальной толщиной масляной плёнки. Рост коэффициента трения, связанный с нарушением её сплошности (разрушением) между покрытием и вкладышем наступает при 1,5 кратном превышении температуры или давления. Покрытие выдерживает длительные высокие циклические нагрузки и перегрузки, имеющие место при работе мощных дизелей. Из-за остаточной пористости покрытие удерживает масло, особенно необходимое при пуске холодного двигателя. Свободный графит во время работы выходит на поверхность и выполняет роль дополнительной твёрдой смазки. Опыт многолетней эксплуатации (в течение 8 лет эксплуатации более трехсотен восстановленных локомотивных коленчатых валов какие-либо технические дефекты не зафиксированы) показал, что срок службы восстановленных шеек коленвалов

больше новых в два раза.. Причём, замечательным является то обстоятельство, что в экстремальных и аварийных ситуациях (прекращение подачи масла, наличие абразивных частиц) покрытие проявляет большую живучесть в сравнении с основным материалом коленвала.

Базируясь на технологических исследованиях и опыте сверхзвуковой электродуговой металлизации спроектирована, изготовлена и введена в промышленную эксплуатацию полуавтоматическая линия для восстановления изношенных поверхностей шеек коленчатых валов мощных дизелей (Рис. 6)

Линия содержит полуавтоматы абразивно струйной обработки и металлизации. Полуавтоматы предназначены для работы в комплекте с программируемым контроллером и установкой сверхзвуковой электродуговой металлизации ПЛАЗЕР – СМ



а



б

Рис.6. а – напыление покрытия на шейку коленвала мощного локомотивного дизеля
б – полуавтомат для напыления

Подводя итоги, следует отметить, что существующая практика газотермического напыления может существенно измениться с применением передовых подходов (в частности переходом к работе на сверхзвуковых скоростях) в пользу резкого повышения качества покрытий без его удорожания и расширения номенклатуры напыляемых изделий.