

Время от времени появляются так называемые "прорывные" технологии, которые радикально меняют устоявшиеся представления специалистов. К таким технологиям можно отнести газотермическое напыление защитных покрытий. Есть много примеров, когда такие покрытия в десятки раз повышают срок службы деталей и изделий, работающих в экстремальных условиях — причём, что характерно, при относительно невысоких затратах.

С. В. ПЕТРОВ, д-р техн. наук,
Институт газа НАН Украины

Методы радикального повышения качества газотермических покрытий

В основе применения газотермических покрытий лежит простая идея: создать поверхностный слой, способный самым эффективным образом противостоять рабочим нагрузкам. А поскольку данный метод позволяет наносить практически любые материалы и композиции, то новая рабочая поверхность с таким покрытием, даже имеющим исключительно малую толщину, может удовлетворять самым противоречивым, казалось бы, требованиям.

История развития газотермического напыления как самостоятельного технологического направления началась лет 20 назад. Тогда усилия разработчиков практически сводились к тому, чтобы недостатки процесса, по возможности, превратить в достоинства. Например, искались такие варианты его применения, когда повышенная пористость покрытия полезна и не может быть получена иными методами, кроме напыления. Однако, появление в середине 80-х годов газодетонационного способа напыления заставило специалистов в области газотермических покрытий изменить свои взгляды на этот процесс.

Газодетонационное напыление продемонстрировало значительно более высокие — в сравнении с другими способами — качественные показатели наносимых покрытий. Однако, в силу существенных ограничений, этот способ напыления долгое время находил практическое применение только в авиационной промышленности.

Настоящий "технологический взрыв", вызвавший масштабную коммерциализацию техпроцесса, начался с изобрете-

нием сверхзвукового газопламенного напыления типа HVOF "JET KOTE". Вскоре на рынке технологий появилось множество его подвидов. В области плазменного напыления, например, им стал высокопроизводительный процесс Plazjet в нескольких модификациях, реализуемый с помощью плазмотронов мощностью 200 и 250 кВт. С момента разработки технологии HVOF "JET KOTE" все дальнейшие усилия разработчиков аппаратуры, в сущности, сводятся к повышению скорости полета частиц в процессе напыления, а технологий — к совершенствованию материалов для напыления, совместимых с новой аппаратурой. Таким образом события в мире развиваются и по сегодняшний день, хотя основное внимание все же уделяется применению современных

средств автоматизации, управления и контроля.

Плазменный способ не относится ныне к числу наиболее распространенных среди технологий газотермического напыления, хотя он является наиболее универсальным по виду напыляемых материалов и — во многих случаях — оказывается технически либо экономически более предпочтительным. Широкое распространение на предприятиях стран СНГ, например, получила установка плазменного напыления "Киев-7", несмотря на хорошо известные специалистам ограничения по качеству наносимых покрытий: сравнительно высокую пористость, низкую прочность сцепления покрытия с основой, значительные изменения химического состава напыляемого материала и другие.



Однако особенности конструкции установки позволяют найти выгодное решение с точки зрения оптимального критерия "цена – качество покрытий". "Киев-7", изначально предназначенная для работы на дозвуковых скоростях истечения плазменной струи, может быть достаточно просто модернизирована и приспособлена для работы в режиме сверхзвуковых скоростей. Для этого требуется замена плазмотрона, возможно – порошкового питателя-дозатора, – а также доработка системы газоподготовки. Плазмтроны для установки могут быть выполнены в широком диапазоне номинальных мощностей – от 40 до 160 кВт. При необходимости повышения производительности напыления, в соответствии с увеличившейся потребляемой мощностью, потребуется модернизация источника электропитания.

ПРЕИМУЩЕСТВА СВЕРХЗВУКОВОГО ГАЗОПЛАМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ

Что дает переход к сверхзвуковой скорости истечения плазменной струи? Прежде всего, он 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, соответственно, в 9-16 раз. Именно благодаря этому фактору происходит качественный скачок в улучшении всех рабочих свойств напылённых покрытий.

Чтобы обеспечить достаточную нагревательную способность сверхзвуковой струи, в качестве плазмообразующего газа используется высокоэнтальпийная смесь воздуха с метаном, а также формируется струя плазмы с пролонгированным начальным участком. Кроме того, сверхзвуковая плазменная струя является удобным для практического использования объектом. Она характеризуется видимой волновой структурой (рис. 1)

Износ электродов плазмотрона, изменение режима его работы отражаются

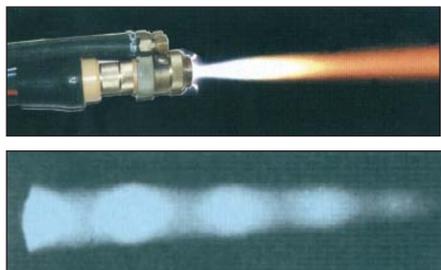


Рис. 1. Волновая структура сверхзвуковой струи плазмы.

на геометрии и взаимном расположении скачков уплотнения. По их виду 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.

Дополнительной причиной повышения качества покрытий при работе на сверхзвуковых скоростях, кроме возросшей кинетической энергии, является уменьшение угла раскрытия двухфазного потока (рис. 2). Это происходит благодаря ламинаризации сверхзвукового течения. Разброс скоростей и температур центральных и периферийных частиц резко уменьшается. Периферийные частицы, имеющие меньший запас энергии, участвуют в формировании покрытия, а не ослабляют его.

В итоге, при напылении сверхзвуковым плазмтроном – даже без тщательной оптимизации процесса – значительно улучшаются все качественные показатели покрытий. Пористость снижается с 8-12 % до 1-3 %, а при оптимизации процесса может быть получена даже нулевая пористость. Прочность сцепления покрытия с основой увеличивается в 1,5-2 раза в зависимости от напыляемого материала. Степень окисленности и выгорания элементов (например, углерода) снижается на 50-80%, в отдельных случаях удаётся получить покрытие по химическому составу совпадающее с исходным материалом.

Всё это даёт возможность как расширить область применения плазменного напыления, так и повысить качество уже хорошо отработанных изделий.

Коллективом специалистов с участием автора настоящей статьи выполнен сверхзвуковой плазмтрон по 3-электродной схеме с одиночной металлической межэлектродной вставкой. "По идеологии" эта схема близка плазмтрон ПУН-1 установки "КИЕВ-7", и в зависимости от исполнения плазмтрон может охлаждаться водой или плазмообразующим газом (рекуперативное охлаждение МЕВ).

Предложенный усовершенствованный плазмтрон имеет следующие свойства:

1. Стабилизацию длины дуги на уровне выше самоустанавливающейся.
2. Расширение диапазона регулирования среднемассовой энтальпии в плазменной струе.
3. Снижение регулярных и нерегулярных пульсаций параметров дуги и, соответственно, плазменной струи.

4. Подавление крупномасштабной турбулентности в плазменной струе и, соответственно, рассеивания напыляемых частиц.

5. Воспроизводимость всех параметров плазменной струи (скорость и энтальпия, их пульсационные и осредненные значения, профили поперек струи и распределения вдоль нее) в течение заданного гарантированного времени работы плазмтрона.



6. Простота и удобство обслуживания, надежность и ремонтпригодность, что очень важно для всех промышленных плазмтронов.

Рис. 2. Напыление никромового порошка в сверхзвуковой плазменной струе.

ЭЛЕКТРОДУГОВАЯ МЕТАЛЛИЗАЦИЯ В РЕМОНТЕ И ВОССТАНОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ

Пожалуй, первое место по распространенности среди методов газотермического напыления сегодня занимает процесс электродуговой металлизации. В качестве напыляемого материала здесь используются как порошковые, так и сплошные токопроводящие проволоки. В последние годы электродуговая металлизация, в основном, применяется в ремонтном производстве. Она оказалась эффективной для ремонта широкого спектра деталей, в частности, при восстановлении изношенных шеек коленвала и деталей цилиндропоршневой группы. Эта технология все более активно вытесняет наплавку, поскольку покрытия, полученные электродуговой металлизацией, лишены недостатков наплавки. На сегодняшний день на ремонтных предприятиях успешно работает множество участков по восстановлению газотермическим напылением изношенных коленвалов и других деталей автомобилей, тракторов, компрессоров и т.п.

Кстати, попытки перенести успешный опыт восстановления автомобильных и тракторных коленвалов с использованием плазменной, электродуговой, газопламенной или детонационной технологий на ремонт подвижного железнодорожного состава долгое время не удавались. Сегодня, когда эта проблема решена, причины предшествующих неудач понятны. Восстановление тяжело нагруженных коленвалов локомотивных дизелей стало возможным с выпол-

нением двух условий – появление аппаратуры сверхзвуковой электродуговой металлизации, а также порошковой проволоки специального состава. Эти два обстоятельства позволили получить принципиально новое покрытие с достаточным запасом механической прочности, высокой износостойкостью и антизадирными свойствами.

Примером удачного внедрения электродуговой металлизации на железнодорожных ремонтных предприятиях является организация нескольких участков по восстановлению локомотивных коленвалов дизелей типа 12VFE, в том числе, в локомотивном депо "Иловайск" (рис 3,4).

На этих участках в течение 8 лет восстановлено более 300 коленвалов, все из них на сегодняшний день находятся в эксплуатации, причем ни одного случая отказа не зафиксировано, ресурс восстановленных коленвалов уже вдвое превысил ресурс заводских. Успех практической реализации технологии в широком масштабе даёт все основания утверждать, что таким же образом могут быть восстановлены и упрочнены коленвалы более мощных дизелей типа 5Д49. Такая уверенность подкрепляется результатами лабораторных исследований, которые показывают, что покрытие способно выдерживать значительно большие удельные рабочие нагрузки, чем основной материал. Что же касается экономии, то восстановление трех коленвалов дизелей типа 5Д49 окупает все расходы по организации ремонтного участка (с учетом выполнения пусконаладочных работ и обучения персонала в течение 2-3 недель) при наличии на предприятии шлифовальных станков и вращателей.

Существует и подобное по идеологии решение, используемое как для изготовления, так и ремонта деталей цилиндропоршневой группы (втулки цилиндра и кольца). Например, успешно применяется плазменное нанесение покрытий на поршневые кольца на одесском предприятии "МОТОРКОМ" с использованием установок "Киев-7". Что касается восстановления с упрочнением втулки цилиндра, то сегодня наиболее передовые решения в СНГ предлагают специалисты из МГТУ им. Баумана, где организован участок, на котором восстанавливаются плазменным способом втулки 2Д100 (диаметром 207 мм), Д50 (диаметром 318 мм), 6Д49 (диаметром 260 мм), К6S310DR (диаметром 170 мм). Проведенные эксплуатационные испытания показали высокую экономическую и техническую эффективность такого восстановления с упрочнением: покрытие восстановленных втулок из-

нашивается меньше, чем у заводских, и значительно лучше выдерживает экстремальные аварийные нагрузки.

Например, при обрыве шатуна повреждается зеркало цилиндра втулки основного материала, а на покрытии следов практически не остается. Аналогичную картину приходилось наблюдать на восстановленных коленвалах, когда прекращение подачи масла приводило к задиру поверхности шейки из основного материала (не восстановленной), а соседняя поверхность, имеющая покрытие, оставалось практически нетронутой. Подобное явление происходит благодаря проявлению эффекта "самосмазывания".

Технология восстановления с упрочнением методом сверхзвуковой электродуговой металлизации проще, чем плазменная, а качество покрытия – выше. Примечательно, что в этом случае отпадает также необходимость в фосфатации поверхности, поскольку покрытие по своей природе уже имеет маслоудерживающий рельеф. Такой рельеф особенно необходим во время приработки колец. Экономия при восстановлении с упрочнением втулок меньше, чем при ремонте крупногабаритных коленвалов, поскольку цена коленвала значительно выше цены втулки. Однако, в относительном масштабе эти мероприятия эквивалентны. Как в одном, так и в другом случае относительные затраты на ремонт с упрочнением почти на порядок меньше стоимости новой детали, поскольку срок службы восстановленной детали будет как минимум в два раза выше заводской.

Таким образом, можно утверждать, что эффективность технологий восстановления с упрочнением коленвала и втулки цилиндра, построенных на базе процесса сверхзвуковой электродуговой металлизации, доказана на практике. Они спо-



Рис. 3. Процесс напыления покрытия на шейку коленвала дизеля 12VFE.



Рис. 4. Полуавтомат для восстановления локомотивных коленвалов.

собны внести значительные изменения в традиционную практику ремонта различных тяжело нагруженных деталей, резко снижая эксплуатационные расходы с одновременным повышением надежности, поддержанием в работоспособном состоянии наиболее ответственных узлов подвижного состава.

ПРИМЕНЕНИЕ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ БОРЬБЫ С КОРРОЗИЕЙ

При строительстве и эксплуатации современных сооружений, широко использующих металлоконструкции, актуальна проблема обеспечения долговременной надежной защиты этих конструкций от коррозии. Старение сооружений в процессе эксплуатации с преждевременным выходом их из строя обусловлено, в первую очередь, коррозией, а также абразивными; ударными и другими силовыми воздействиями. Причем опыт показывает, что процессы физического износа несущих конструкций имеют резко неравномерный характер. Для отдельного сооружения степень агрессивности коррозионной среды может изменяться от мало- до средне- и даже сильно-агрессивной. В ре-

зультате конструктивные элементы различных сооружений могут иметь различный ресурс, который отличается на 10...30 лет. При затруднённом доступе и недостаточном техническом надзоре это является причиной частичного или полного разрушения конструкций.

Накопленный многолетний мировой опыт защиты стальных конструкций мостов от коррозии свидетельствует о том, что существует экономически выгодное и технически достаточно просто реализуемое решение. Наиболее надежная долговременная защита (подтвержденная данными мониторинга на реальных объектах, который длится уже более 50 лет) осуществляется с использованием газотермических покрытий на основе алюминия или цинка.

Сегодня в странах Америки и Европы работает множество фирм, которые предлагают для защиты от коррозии газотермические покрытия из Al и Zn. Однако, все они недалеко ушли от уровня технологий середины 70-х годов. Покрытия на большие площади наносят, как и ранее, электродуговыми металлизаторами усовершенствованной конструкции с использованием проволок Al и Zn. Но наиболее передовые фирмы предлагают новые решения в области газотермического нанесения протекторных покрытий на основе Al и Zn с использованием техники сверхзвукового напыления в различном исполнении. Так, например, в США фирма Praxair-TAFA предлагает сверхзвуковые керосино-кислородные горелки, ряд фирм активно пропагандируют метод сверхзвукового холодного напыления Cold Spray и различные вариации методов сверхзвукового газопламенного напыления HVOF. С использованием новых материалов возможно получение композиционной структуры покрытия. Так, сообщения фирм Metallisation Limited, DUDLEY, WEST MIDLANDS свидетельствуют о том, что Al-Zn-Mg композиция, полученная методом сверхзвукового напыления, обеспечивает 3-5-кратное увеличение стойкости против коррозии. Причем, площадь покрытия незначительно сокращается лишь в первое время контакта с агрессивной средой, а в дальнейшем не растворяется, а превращается в плотный нерастворимый осадок, который пассивирует поверхность и останавливает электрохимическую коррозию. Такое покрытие не требует дополнительной пропитки.

Однако, в настоящее время эти передовые методы из-за высокой стоимости нанесения покрытий находят практическое применение только для защиты небольших по площади поверхностей. Высокие затраты обусловлены слож-

ностью, громоздкостью аппаратуры и большими расходами кислорода и топлива (керосина или горючего газа). Удельный расход энергии при работе установки составляет 15 кВтЧч/м.

Коллектив специалистов (в состав которого входит и автор статьи) сумел разработать процесс получения на сегодняшний день наиболее высококачественных – и при этом экономичных по расходу энергии – покрытий. Процесс основан на использовании сверхзвуковой электродуговой металлзации. Для нанесения антикоррозионных покрытий используется специальный металлатор в ручном исполнении (Рис.5) и порошковая проволока специального состава.

Первоначально покрытие разрабатывалось для защиты корпусов ледоколов, нефтяных платформ и других изделий, которые эксплуатируются в сильно- и слабоагрессивных средах, в том числе – растворах солей. Это покрытие, наряду с обеспечением коррозионной стойкости, обладает 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 отработки материала покрытия и технологии его нанесения, что подтверждено более чем 10-летней промышленной эксплуатацией изделий, а именно трубопроводов различного назначения.

В разработанном 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" находится в состоянии физико-химического равновесия до изменения внешних условий. Такими изменениями могут быть механические разрушения покрытия, изменение химического состава внешней агрессивной среды, изменение полярности приложенных потенциалов и т.д. После таких изменений система "алюмокерамическое покрытие – чёрный металл" снова перестроится. Таким образом,



Рис. 5. Работа сверхзвукового электродугового металлатора.

покрытие работает как протекторное только в начальный период эксплуатации и некоторое время после изменения внешних условий, поэтому оно получило название "протекторное пассивирующее покрытие". Оно, образно говоря, является "самозалечивающимся", поскольку самостоятельно ликвидирует несплошности, участки повреждения и частичного отслоения.

Такое покрытие способно конкурировать с любыми аналогами и по своим эксплуатационным характеристикам превосходит лакокрасочные и гальванические покрытия, получаемые окунанием в расплав, стекломалеваы, битумные, битумно-резиновые, полимерные и эпоксидные.

Опыт многолетней промышленной эксплуатации при прокладке технологических трубопроводов показал, что подобный процесс обеспечивает нанесенному антикоррозионному покрытию повышенные механические свойства: по износостойкости оно 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 среды "вода-песок", смещению грунта и т.д. Стальные листы с таким покрытием поддаются холодной штамповке и прокатке без ухудшения защитных свойств покрытия.

Испытания в реальных условиях эксплуатации подтвердили, что алюмокерамическое покрытие, полученное сверхзвуковым электродуговым напылением, сегодня практически не имеет конкурентов по критерию "цена – защитные свойства". Наиболее эффективно использование такого покрытия при строительстве новых мостов и сооружений, причем его применение особенно актуально для защиты от коррозии закладных элементов стальных конструкций, отвечающих за безопасность, и доступ к которым ограничен.