

УДК 621.793.7.001.5

**ВЫБОР ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ
АВТОМОБИЛЕЙ ЭЛЕКТРОДУГОВЫМ НАПЫЛЕНИЕМ***канд. техн. наук, доц. А.В. ДУДАН**(Полоцкий государственный университет, Беларусь);**Т.В. ВОРОНА, С.А. ДОВЖУК**(Кировоградский национальный технический университет, Украина);**Ю.В. БРУСИЛО, канд. техн. наук, доц. Р.М. САЛИМОВ**(Национальный авиационный университет, Украина);**Ю.В. ВОЛКОВ**(Одесская национальная морская академия, Украина)*

Представлен сравнительный анализ технических характеристик и технологических параметров выпускаемого в настоящее время отечественного и зарубежного оборудования для электродугового напыления. Даны рекомендации по выбору оборудования для упрочнения и восстановления деталей автомобильного транспорта. Показано, что правильный выбор конструкции оборудования для напыления позволяет увеличить скорость и температуру струи транспортирующего газа и частиц, уменьшить диаметр капель, повысить плотность и снизить окисляемость покрытий. Использование в качестве распыляющего газа продуктов сгорания пропано-воздушной смеси позволит активировать процесс электродугового напыления.

Введение. Повышение долговечности деталей автомобильного транспорта является важнейшей задачей отрасли. Увеличить долговечность деталей автомобилей и тем самым уменьшить зависимость от зарубежных поставщиков по основным наиболее дорогостоящим и металлоемким деталям позволит использование технологий упрочнения новых деталей и восстановление изношенных. Способ упрочнения и восстановления деталей должен обеспечивать их высокий ресурс, экологическую чистоту производства, быть достаточно универсальным, простым и доступным.

В мировой практике по разработке и применению технологий упрочнения и восстановления деталей автомобильного транспорта все большее внимание уделяется электродуговому напылению (ЭДН) [1–6]. Это обусловлено многими достоинствами метода, однако в первую очередь тем, что разработанное оборудование для электродугового напыления позволяет наносить покрытия по качеству, не уступающему покрытиям, нанесенным плазменным и детонационным методами.

Постановка проблемы. Качество наносимого покрытия, производительность процесса в значительной мере зависят от технических характеристик применяемого оборудования. При этом решающее влияние на эксплуатационные свойства покрытия оказывает конструкция оборудования. В настоящее время в эксплуатации находится широкая номенклатура установок для электродугового напыления различных фирм. Однако недостаточно изучено влияние основных технических характеристик установок для напыления на физико-механические свойства получаемых покрытий и не проведен их сравнительный анализ, не разработаны научно обоснованные рекомендации по взаимозаменяемости и применению оборудования для электродугового напыления. Все это затрудняет правильный выбор оборудования для организации участков электродугового напыления и применение технологических процессов, обеспечивающих высокую производительность и качество покрытий, соответствующих современному мировому уровню развития данной области техники.

Электродуговое напыление находит в настоящее время самое широкое применение, особенно в европейских странах, и постепенно вытесняет традиционный газопламенный метод. Это связано [2; 4] в основном с более высокой производительностью электродугового метода (в 3...4 раза выше, чем при газопламенном напылении), распространенностью и доступностью источника энергии для плавления металла, с получением более качественных покрытий с несколько большей прочностью сцепления с основным металлом, возможностью механизации и автоматизации процесса. Электродуговой метод обладает более высокой тепловой эффективностью, достигающей 57 %, по сравнению с 13 и 17 % при газопламенном и плазменном напылении соответственно. Поэтому в последнее время наметилась тенденция к замене газопламенного напыления электродуговым напылением.

Анализ публикаций и практических разработок. Анализ научно-технических источников и практических исследований за последнее десятилетие показали [1–9], что развитие оборудования для электродугового напыления идет по пути расширения технологических возможностей и увеличения ресурса работы, повышения производительности и удобства эксплуатации, сокращения потерь напыляемого материала и повышения качества покрытий. При этом основные усилия направлены на решение задачи

управления параметрами газотермического потока: скоростью и температурой газа и частиц, коэффициентом сосредоточенности потока, гранулометрическим составом частиц, свойствами частиц и несущей среды.

Ведущие фирмы в области разработки и производства оборудования для газотермического напыления создают модульные системы установок электродугового напыления (таблица), большим преимуществом которых является совместимость отдельных узлов, таких как электрометаллизаторы, пакеты шлангов и т.д., со всеми источниками питания и специальной оснасткой, входящими в систему.

Характеристика современных установок для электродугового напыления

Установка, фирма, страна	Ток, А	Материал	Производительность, кг/ч
Ares-pray, SNMI Франция	200...800	Сталь, алюминий, цинк	7...30; 3,5...15; 16...65
VT-600, Colmo-поу, США	До 500	Сталь, алюминий, цинк	25,4; 13,6; 70,7
ELMET-P2, RUKOV, Чехия	200...400	Алюминий, цинк	25; 66
LD/U2, OSU, Германия	До 200	Сталь, алюминий, цинк	9,5...10,2; 6; 20
LD/U3, OSU, Германия	До 300	Сталь, алюминий, цинк	14,2...15,3; 9; 30
LD/S2, OSU, Германия	до 1400	Сталь, алюминий, цинк	65,8; 37,1; 140
ЭМ-14, Россия	До 320	Сталь, алюминий, цинк	10; 8; 30
ЭМ-14М, Россия	50...400	Алюминий, цинк	до 12,5; до 40
ЭМ-17, Россия	50...400	Сталь, алюминий, цинк	до 18; до 12; до 40
ЭДМ-5, Россия	До 400	Сталь, алюминий	до 20; до 10
ЭМГ-2, Украина	До 400	Сталь	18,8
ЭМП-1, Украина	До 300	Сталь, алюминий	24; 14
УСЗМ-2М, Украина	до 400	Сталь	до 20
РЕ-2, Польша	до 300	Сталь, алюминий	12; 8
АДМ-8, Беларусь	до 500	Сталь, алюминий, цинк	30; 18; 40
АДМ-10, Беларусь	до 380	Сталь, алюминий, цинк	18,4; 6,5; 16,8

С целью получения покрытий с высокими характеристиками прочности сцепления, плотности, износостойкости и, следовательно, повышения ресурса деталей автомобилей был сделан сравнительный анализ технических характеристик и технологических параметров выпускаемого в настоящее время отечественного и зарубежного оборудования для электродугового напыления, а также качества получаемых покрытий с использованием современных установок и указанного метода, что явилось задачей настоящего исследования.

Характеристика и особенности оборудования для электродугового напыления. Результаты экспериментальных исследований. Наилучшими показателями обладает оборудование, разработанное Физико-механическим институтом НАН Украины (г. Львов) совместно с ГМП «Газотермик» при ФМИ НАН Украины, и оборудование, производимое НПО «МАД» (г. Минск, Беларусь).

В Физико-механическом институте НАН Украины (г. Львов) путём совершенствования конструкции оборудования для электродугового напыления и повышения защитно-энергетического уровня факела распыла была решена задача повышения физико-механических свойств покрытий за счёт снижения окисления диспергированного металла в факеле распыла и повышения скорости полёта частиц [7].

Оборудование для электродугового напыления монтируется на суппорте токарно-винторезного станка 16К20 (рис. 1) и состоит из приводного механизма и механизма подачи, системы распыления. В приводной механизм станка входит электропривод (двигатель переменного тока) и одноступенчатый червячный редуктор с горизонтальной приводной осью. Выходные концы оси в верхней части оборудованы роликами, которые служат активными протяжными элементами правой и левой части механизма протяжки электродных проволок. Прижатие проволоки осуществляется пассивными роликами, которые размещены в откидной крышке металлизатора. Правая и левая части подающего механизма электроизолированы между собой и корпусом металлизатора. Изменяя скорость вращения шпинделя и расстояние между суппортом и шпинделем, осуществляется регулирование скорости перемещения установки для электродугового напыления относительно поверхности образца и дистанции напыления. Толщина напыленного слоя регулируется скоростью перемещения металлизатора и числом его проходов относительно поверхности покрытия.

Принцип работы металлизатора состоит в непрерывной подаче двух проволок в распылительную головку, где между ними горит дуга. Расплавленный дугой материал проволок направленным потоком сжатого воздуха переносится на подготовленную поверхность металла. Система распыления представляет собой головку с соплом и направляющими наконечниками, в последние подаются две электродные проволоки и воздух под рабочим давлением. Токоподающие кабели крепятся к кронштейнам, которые размещены в передней части металлизатора.

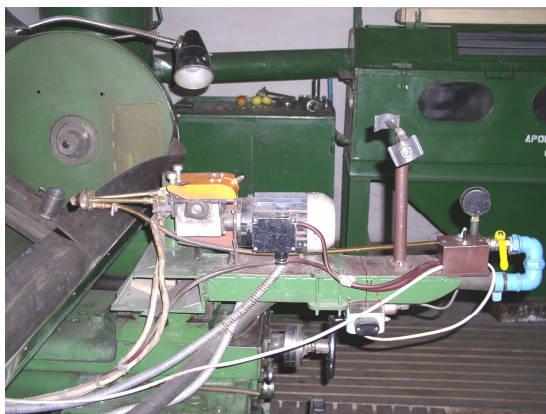


Рис. 1. Установка для электродугового напыления с металлизатором ЭМ-14

Для нанесения покрытий используются аппараты с различной дутьевой системой и геометрией сопла. В настоящее время известно несколько схем формирования гетерогенного металловоздушного потока при электродуговом напылении: диафрагмовая, центральносопловая, дифференциальная и закрытая [7]. В серийном производстве самое широкое распространение получила диафрагмовая схема, которая, в частности, использована при изготовлении установок для электродугового напыления Барнаульского аппаратно-механического завода (Россия) и фирм «Metco» и «Mogul» (США). При использовании этой схемы формируется достаточно широкий металловоздушный поток. Применение этой дутьевой системы эффективно для нанесения антикоррозионных покрытий. Центрально-сопловая схема использована в металлизаторе ЭМ-17 (Барнаул), где создается узкий металловоздушный поток, который является особенно эффективным при нанесении покрытий на тела вращения, например, на валы, в том числе и коленчатые [7; 10].

С целью повышения качества покрытий целесообразно использовать распылительную головку для металлизатора, в основу которой положена закрытая схема формирования металловоздушного потока. В работе [7] отмечается преимущество аппаратов с закрытой схемой и дифференциальным соплом по сравнению с открытой схемой центрального сопла. Закрытая схема формирования металловоздушного потока позволяет использовать чрезвычайно мелкие фракции распыляемых частиц (диаметром менее 50 мкм), которые обладают высокой скоростью полета – 50...130 м/с (рис. 2).

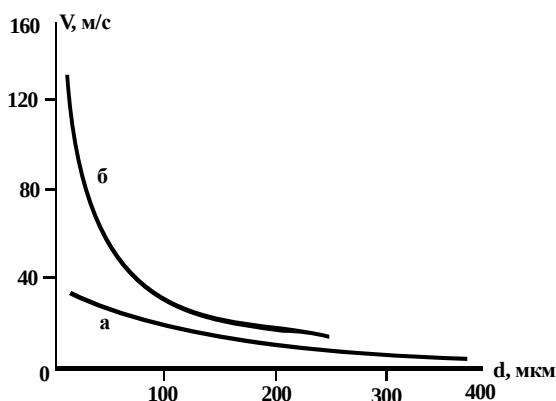


Рис. 2. Зависимость скорости полета частиц расплава металла от их размера при реализации различных схем формирования металловоздушного потока:
а – центрально-сопловая схема; б – закрытая схема

Такую схему распыления следует использовать, когда возникает необходимость нанесения мелко-дисперсного покрытия (50...200 мкм) распылением порошковых проволок, в состав шихты которых входят тугоплавкие компоненты. Закрытая схема формирования металловоздушного потока использована в аппаратах производства ГП «Газотермик» при ФМИ НАН Украины. Закрытая схема имеет свои преимущества в том случае, когда размер дуги в сечении становится соизмеримым с сечением цилиндрического канала, в котором она горит. Закрытая схема формирования металловоздушного потока позволяет реализовывать два режима напыления: непрерывный и импульсный. При уменьшении диаметра цилиндрической

части сопла давление в сопле может стать равным давлению в дуговом промежутке. При таком соотношении давлений холодный воздух активно будет проникать в зону горения дуги и обусловит сокращение ее длины. Когда длина сократится настолько, что расплав замкнет дуговой промежуток, возникает импульсный режим. Соотношение давлений в дуге сильно зависит от диаметра сопла и мощности дуги. Экспериментально установлено, что чем больше диаметр сопла, тем большей должна быть мощность дуги, чтобы реализовался импульсный режим работы аппарата. При работе аппарата для ЭДН в импульсном режиме торцы проволоки, которые плавятся, становятся параллельными между собой. При жидкой фазе, когда торцы электродов-проволок замыкаются, реализуется рейкотронный эффект. Рейкотронный эффект проявляется в том, что в щели между двумя параллельными направляющими электродами действует электродинамическая сила, которая направлена параллельно к поверхностям электродов, которые плавятся. Расплав выбрасывается электродинамическими силами из промежутка и возникает пауза, после которой цикл повторяется. Частота выбросов зависит от скорости подачи проволоки-электрода. Чем выше скорость подачи проволоки, тем выше частота выброса расплава. При таком способе электродугового напыления за счет рейкотронного эффекта порции жидкого металла получают дополнительный импульс, который повышает скорость полета в начальный момент и способствует диспергированию расплава. При использовании «закрытой» схемы максимальный размер распыленных частиц не превышает 50 мкм.

Оборудование для электродугового напыления характеризуется следующими параметрами: напряжение 18...36 В; сила тока 50...600 А; мощность дуги 5...20 кВт; расстояние от сопла до напыляемой поверхности 50...200 мм; скорость продольного перемещения металлизатора 5...10 мм/об; частота вращения вала 0...60 об/мин; давление сжатого воздуха (распыляющего газа) 0,35...0,5 МПа; расход сжатого воздуха (распыляющего газа) 60...150 м³/ч; диаметр проволоки 1,6...2,0 мм; скорость подачи проволоки 0,05...0,35 м/с.

Установки для электродугового напыления, производимые НПО «МАД» (г. Минск), соединяют в себе достоинства электродугового и высокоскоростного напыления. Отличительной особенностью является наличие малогабаритной высокоэффективной камеры сгорания пропано-воздушной смеси, которая используется в качестве транспортирующего газа. Продукты сгорания образуют на выходе из сопла сверхзвуковую струю со скоростью свыше 1500 м/с при 2200 К (рис. 3). Важное достоинство предлагаемой аппаратуры – работа камеры сгорания на пропано-воздушной смеси. Отсутствие кислорода в качестве окислителя топлива значительно снижает себестоимость наносимых покрытий и повышает надежность и безопасность проводимых работ. Оригинальная конструкция камеры сгорания, использование эффективного катализатора горения, отсутствие водяного охлаждения камеры и наличие устройства автоматического поджига смеси существенно повышают надежность оборудования и облегчают работу обслуживающего персонала.



Рис. 3. Аппарат для электродугового напыления с камерой сгорания

Аппарат имеет следующие технические характеристики:

- диаметр применяемой проволоки 1,5...2,2 мм;
- максимальный рабочий ток 380 А;
- расход воздуха 60 м³/ч;
- расход пропан-бутана 0,011 кг/ч;
- габариты 290 × 255 × 75 мм; масса аппарата 3,1 кг;
- производительность, кг/ч: по стали – 18,4; по алюминию – 6,5; по цинку – 16,8 при диаметре проволоки 2 мм.

В состав оборудования для электродугового напыления входит: установка для электродугового напыления; электрический блок управления; коробка распределения; воздушно-силовые шланги по 2,5 м; высоковольтный провод длиной 2,5 м; комплект быстроизнашивающихся деталей. Установка для электродугового напыления содержит аппарат для электродугового напыления, пульт управления и блок коммутации. В качестве источника питания хорошо зарекомендовал себя типовой сварочный источник с жесткой характеристикой ВДУ-506. Аппарат комплектуется соединительными кабелями с коммутирующей коробкой и пультом управления.

Конструктивные достоинства предлагаемого оборудования – быстросъемные распылительные головки; легкая и быстрая замена проволок и переход с одного диаметра проволоки на другой; высокая электротермозащищенность; отсутствие регулировок; быстрый доступ ко всем узлам аппарата; простые и быстро заменяемые токосъемные элементы; замена подающих роликов без разборки аппарата; блочно-узловая сборка предполагает быстрое техобслуживание и ремонт.

В основе работы установок лежит процесс плавления проволок электрической дугой и распыление расплавленного металла высокоскоростной струей продуктов сгорания пропано-воздушной смеси. В аппаратах используются восстановительные транспортирующие газы с оригинальной подачей через профилированные сопла, камера сгорания в системе подачи газов, особое взаимное расположение токоподводов и распыляющего сопла. Скоростной напор потока, выражающийся отношением кинетической энергии к единице объема газа и характеризующий силу, действующую на частицу в потоке, составляет 234 кПа, по сравнению с 75 кПа при традиционном электродуговом напылении. При этом частицы расплавленного металла разгоняются в потоке до скорости 500 м/с и формируют покрытие, которое имеет прочность сцепления вдвое выше, чем при традиционном электродуговом напылении и достаточное для работы в самых экстремальных условиях, в том числе и при наличии ударно-абразивного изнашивания. Использование в качестве распыляющего газа продуктов сгорания пропано-воздушной смеси значительно снижает окисление напыляемого материала и выгорание легирующих элементов. При равном соотношении воздуха и пропана покрытие содержит углерода вдвое меньше, чем в исходном материале, а при распылении чистым воздухом (традиционное ЭДН) содержание углерода уменьшается почти в три раза. Условия образования, транспортировки частиц и формирования покрытия, отличные от других методов газотермического напыления, приводят к образованию иных структур в материале покрытия. Малое количество хрупких оксидов, значительное количество интерметаллидов, наряду с образованием закалочных структур и достаточно высокой пластичностью напыленного слоя, создают предпосылки для использования данного оборудования при упрочнении и восстановлении ответственных деталей автомобилей и существенно расширяют номенклатуру обрабатываемых деталей. Кроме того, в условиях высокоскоростного напыления происходит изменение коэффициента сосредоточенности материала в струе в сторону его увеличения, поскольку угол расхождения двухфазных сверхзвуковых струй меньше, чем дозвуковых, и составляет 5...7°. Как следствие, уменьшается диаметр пятна напыления, возрастает коэффициент использования материала. Он достигает величины 0,85, против 0,75 при традиционном электродуговом напылении.

Таким образом, к основным достоинствам аппаратов можно отнести:

- снижение окисления напыляемого материала и выгорания легирующих элементов;
- увеличение скорости частиц напыляемого материала;
- угол раскрытия струи не превышает 10 градусов;
- коэффициент использования материала увеличивается до 0,85 (против 0,75 у обычных аппаратов для ЭДН).

Так, на основании анализа результатов научно-технических, практических и экспериментальных исследований были сделаны следующие **выводы**:

- основным преимуществом метода электродуговой металлизации является его высокая производительность, которая достигает 50 кг/ч – максимальное значение энергетических КПД распыления и напыления;
- основным недостатком электрометаллизационных покрытий является относительно низкая плотность и прочность сцепления (20...30 МПа), что отрицательно влияет на качество покрытий и эксплуатационные свойства.

Устранить эти недостатки и сохранить преимущества метода электродугового напыления позволит использование для нанесения покрытий установки для электродугового напыления ЭМ-14 с закрытой схемой формирования металловоздушного потока и аппарата для активированного электродугового напыления АДМ-8. Применение закрытой схемы формирования металловоздушного потока при электродуговом напылении [7] обеспечит получение покрытия с высокой плотностью и прочностью сцепления до 180 МПа.

Совершенствование оборудования для напыления [1–10] позволит увеличить скорость и температуру струи транспортирующего газа и частиц, уменьшить диаметр капель, повысить плотность и снизить окисляемость покрытий.

Используемые в качестве распыляющего газа продукты сгорания пропано-воздушной смеси активируют процесс электродугового напыления. Варьированием расходов пропана и воздуха можно создавать нейтральную или восстановительную среду в зоне плавления электродной проволоки и тем самым снижать окисление металла и выгорание легирующих элементов [2; 4; 5]. Горение пропано-воздушной смеси можно рассматривать как дополнительный источник нагрева [2–5].

Таким образом, для упрочнения и восстановления деталей автомобильного транспорта можно рекомендовать установки для электродугового напыления ЭМ-14 с закрытой схемой формирования металловоздушного потока и аппараты для активированного электродугового напыления АДМ-8. Конструкция выбранного оборудования обеспечивает создание покрытий разного функционального назначения с высокими эксплуатационными свойствами, что является важным показателем для повышения ресурса деталей автомобильного транспорта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мчедлов, С.Г. Газотермическое покрытие в технологии упрочнения и восстановления деталей машин / С.Г. Мчедлов // Сварочное производство. – 2007. – № 10. – С. 35–45.
2. Теория и практика нанесения защитных покрытий / П.А. Витязь [и др.]. – Минск: Беларус. навука, 1998. – 583 с.
3. Кудинов, В.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование / В.В. Кудинов, Г.В. Бобров. – М.: Металлургия, 1992. – 250 с.
4. Куприянов, И.Л. Газотермические покрытия с повышенной прочностью сцепления / И.Л. Куприянов, М.А. Геллер. – Минск: Беларус. навука, 1990. – 176 с.
5. Электродуговая металлизация – перспективный метод нанесения защитных покрытий / И.Л. Куприянов [и др.]. – Минск: Беларус. навука, 1988. – 321 с.
6. Газотермические покрытия из порошковых материалов: справ. / Ю.С. Борисов [и др.]. – К.: Наукова думка, 1987. – 544 с.
7. Студент, М.М. Розробка захисних та відновних електрометалізаційних покриттів з використанням порошкових дрітків: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.02.01 / М.М. Студент. – Львів, 1998. – 18 с.
8. Оборудование для восстановления деталей: каталог. – М.: Информагротех, 1990. – 40 с.
9. Каталог сварочного оборудования, расходных материалов, вспомогательного оборудования, сырья для изготовления электродов, газосварочного оборудования, оборудования для специальных способов сварки, резки, наплавки и напыления. – К.: Салон «Сварка», 1994. – 100 с.
10. Воропай, Н.М. Распределение температуры в воздушной струе и напыляемой основе при электродуговой металлизации / Н.М. Воропай, А.И. Мажейка, С.И. Маркович // Автоматическая сварка. – 2004. – № 5. – С. 18–21.

Поступила 11.07.2014

SAMPLING OF THE EQUIPMENT FOR THE REINFORCEMENT AND RESTORATION OF RECIPROCATING ENGINES DETAILS BY THE ELECTRIC ARC SPRAYING

**A. DUDAN, T. VORONA, S. DOVZHUK, J. BRUSILO,
R. SALIMOV, YU. VOLKOV**

The comparative assaying of technical datas and technological parameters of the domestic now domestic and foreign equipment for an electric arc spraying is presented. Recommendations for choice the equipment for a reinforcement and restoration of details the explosive motors are given. It is displayed, that correct sampling of a construction of the equipment tor a spraying allows to augment speed and temperature of a stream of carrying gas and corpuscles, to diminish diameter of drops, to raise density and to lower oxidizability of coverages. Use of in the capacity of volatilising gas of products of combustion of propane-air mixture will allow activating process of an electric arc spraying.