

## Литература

1. О государственной программе развития порошковой металлургии и сварки в Беларуси на 2006-2010 годы: постановление совета Министров Республики Беларусь от 08.08.2002 N 1073 (ред. от 13.12.2005) зарегистрировано в Национальном реестре правовых актов Республики Беларусь 14 августа 2002 г. N 5/10938.

2. Дечко Э.М., Ивашин Э.Я. Энергоэффективность при обработке отверстий по нормативам и рекомендациям зарубежных фирм. / Дечко Э.М., Ивашин Э.Я.// Энергоэффективные технологии, образование, наука и практика: Сб. Материалы международной научно-практической конференции. – Минск, 2010. – С. 109-113.

УДК 631.3.004.67: 621.793.724

### СОВРЕМЕННЫЕ СПОСОБЫ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ НА ИЗНОШЕННЫЕ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ТИПА «КРУГЛЫЕ СТЕРЖНИ»

*Ивашко В.С., д.т.н., профессор; Буйкус К.В., Савич А.С.  
УО «Белорусский национальный технический университет», г. Минск*

#### **Способы восстановления размеров изношенной поверхности.**

Агрегаты и узлы автомобилей представляют собой совокупность множества деталей, подвергающиеся в процессе эксплуатации воздействию различного рода сил и условий, приводящих к необратимым процессам изнашивания их рабочих поверхностей.

По данным исследований, четверть изношенных деталей приходится на детали типа «круглые стержни», то есть количество и конструктивная значимость деталей типа «круглые стержни» являются определяющими в обеспечении работоспособности техники. К деталям типа «круглые стержни» в агрегатах и узлах относятся валы (коленчатый, распределительный и т.д.), а также так детали, имеющие конструктивные поверхности характерные для валов (оси, шкворни и др.).

В производственных условиях разработаны и реализованы десятки различных методов и способов нанесения покрытий на изношенные поверхности деталей. Выбор определенного способа для конкретной детали на предприятиях осуществлялся на основании технического, экономического и организационного анализа требований к восстановленным деталям с учетом исходного материала деталей, их условий работы в сопряжениях, величины износа и конструкционных особенностей, производственной программы, оснащенности предприятия, обеспеченности материалами, энергией, рабочей силой и других конкретных мероприятий. Из практики известно, что для восстановления одной и той же детали неред-

ко применяют несколько способов. Однако все они не равны в технико-экономическом отношении. Типичные способы восстановления деталей типа «круглые стержни» автомобилей представлены в таблице 1.

Таблица 1

**Способы восстановления деталей типа «круглые стержни»**

Деталь	Способ восстановления
Коленчатый вал (шейки)	Автоматическая наплавка под слоем флюса Автоматическая наплавка порошковой проволокой Наплавка в углекислом газе Электроконтактная приварка металлической ленты (проволоки) Плазменное напыление Вибродуговая наплавка в среде жидкости Электродуговая металлизация Широкойслойная наплавка Газовая металлизация Газопламенное напыление гибкими шнуровыми материалами
Распределительный вал (шейки)	Вибродуговая наплавка в среде жидкости Хромирование, железнение Наплавка в углекислом газе
	Автоматическая наплавка под слоем флюса Газопламенное напыление Электродуговая металлизация
Ось опорного колеса (шейка)	Электродуговая металлизация Вибродуговая наплавка в среде жидкости
Цапфа (шейка)	Наплавка в углекислом газе
Ротор электродвигателя или генератора, якорь стартера (посадочные места под подшипники)	Электродуговая металлизация Железнение Наплавка в углекислом газе Вибродуговая наплавка Электроконтактная приварка ленты
Ось колодки переднего и заднего тормоза (шейка)	Электродуговая металлизация
Кулак разжимной заднего тормоза (шейки)	Электродуговая металлизация
Шкворень поворотного кулака	Электродуговая металлизация
Валик педалей сцепления и тормоза	Электродуговая металлизация
Валик вилки включения сцепления	Электродуговая металлизация
Валик рычагов	Электродуговая металлизация
Вал ведомый шестерни привода топливного насоса	Электродуговая металлизация
Ось масляного насоса коробки переменных передач	Электродуговая металлизация
Вилки переключения 1-2 и 3-4 передач (ползуны)	Электродуговая металлизация

Электродуговая наплавка обеспечивает сварочный уровень на границе и весьма малую пористость. Недостатки: глубокое термическое влияние на основной металл с нарушением термообработки примыкающих к наплавке участков детали и возникновением внутренних остаточных напряжений, уменьшающих усталостную прочность детали; деформирование (коробление) изделий; снижение усталостной прочности (долговечности); большой разброс значений твердости по площади и толщине покрытия; вторичная наплавка чрезвычайно затруднена и дает очень высокий процент брака.

При наплавке в среде углекислого газа воздух от расплавленного металла оттесняет струя углекислого газа. Таким образом, отпадает необходимость в очистке наплавленного металла от шлака. К недостаткам этого способа относятся сравнительно большие потери металла на разбрызгивание, необходимость в частых очистках газового сопла от набрызганного металла. Частично разлагаясь под действием высокой температуры дуги, углекислый газ диссоциирует на окись углерода и атомарный кислород. Для предотвращения окисления наплавленного металла возникает необходимость применения специальных сортов проволоки, содержащей раскислители (Mn, Si). Повышается вероятность появления пор, особенно по границам слой-основа из-за окисления углерода в сварочной ванне.

Автоматическая наплавка под слоем флюса обеспечивает защиту зоны дуги и расплавленного металла от воздействия кислорода воздуха, а медленное охлаждение способствует наиболее полному удалению из наплавленного металла газов и шлаковых включений, уменьшение расхода электродного материала благодаря устранению потерь на разбрызгивание и угар, облегчение условий труда, так как процесс механизирован и отсутствует излучающее действие дуги. Однако наблюдается некоторая неравномерность свойств наплавленных изделий, так как каждый последующий наплавленный валик отжигает предыдущий и снижает первоначально достигнутую твердость; более ограниченный, чем, например, при напылении, выбор сочетаний основного и наплавляемого металла, трудность наплавки мелких изделий сложной формы; проблема удержания сварочной ванны расплавленного металла и флюса при наплавке деталей цилиндрической формы (наплавку деталей диаметром менее 50 мм не производят); отсутствие возможности получения покрытия толщиной менее 1,5 мм; возникновение шлаковой корки, которую трудно удалить из-за перегрева наплавляемой поверхности, в результате чего частицы шлака остаются в наплавленном металле, быстрое же удаление шлаковой корки перед наложением последующего валика ускоряет охлаждение металла и способствует появлению микротрещин (это особенно проявляется при наплавке под легированными флюсами), неоднородный химический состав, деформация и понижение усталостной прочности изделия.

Вибродуговая наплавка является разновидностью автоматической электродуговой наплавки. Она ведется колеблющимся электродом, что дает возможность наплавлять металлы при низком напряжении источни-

ка тока. Благодаря этому образуется минимально возможная сварочная ванна, которая из-за быстрого охлаждения существует очень короткое время. В свою очередь это является причиной того, что поверхностный слой наплавленной детали обладает значительной хрупкостью, снижается прочность наплавленных деталей при переменных нагрузках, что объясняется образованием закалочных структур и возникновением растягивающих напряжений в полученных покрытиях. Кроме того, наплавленный слой поражается большим количеством мелких трещин и пор и обладает неоднородной твердостью наплавленного слоя, которая предопределяется перекрытием валиков.

Хромирование получают при осаждении хрома из водных растворов в результате прохождения через раствор электрического тока. К преимуществам способа следует отнести: отсутствие термического воздействия на основной металл, возможности наращивания покрытия в узких пределах по толщине и одновременного восстановления большого количества деталей. К недостаткам – низкая производительность, недостаточная стабильность по составу наносимого сплава, снижение усталостной прочности изделия.

Железные имеют ряд преимуществ по сравнению с хромированием: большая скорость нанесения покрытия, высокий выход металла по току, возможность получения более толстых покрытий, использование более простых и дешевых электролитов.

Общими недостатками процессов гальванирования являются низкая производительность, сложность и трудоемкость подготовительного процесса и нанесения покрытия на отдельные участки детали, вредные условия труда, необходимость в больших производственных площадях, негативное влияние на экологию, относительно высокая стоимость оборудования и использование высококвалифицированной рабочей силы делают процесс дорогостоящим.

При электроконтактной приварке металлической ленты металл основы в месте приварки сильно прогревается на некоторую глубину, что обеспечивает изменение ее химического состава, в ряде случаев в отдельных местах наблюдается несплавление с основным металлом, которое выявляется при шлифовании. Процесс электроконтактной приварки отличается высокой производительностью; минимальными потерями присадочного материала.

Покрытиям, нанесенным газотермическим способом, свойственно наличие пористости. Это покрытие, пропитанное маслом, является самосмазывающимся материалом. Основные причины выделения масла из пор – это различное тепловое расширение металла и масла, а также тепловое расширение находящихся в порах газов. Повышение температуры автоматически вызывает добавочное поступление масла на его наружную поверхность; при охлаждении – излишки масла впитываются в материал покрытия. Подготовка напыляемой поверхности абразивно-струйной обработкой повышает усталостную прочность на 50 %.

При плазменном напылении получают самую высокую температуру факела. Сравнительно низкая производительность процесса напыления, хрупкость покрытия, шум при работе и интенсивное ультрафиолетовое излучение, необходимость очень точного соблюдения технологических режимов, высокая стоимость плазмообразующих газов – недостатки плазменного напыления. Кроме того, плазменный способ отличается высокой стоимостью оборудования, низкой его долговечностью (низкая стойкость электрода и анодного сопла), большими эксплуатационными затратами, высокой себестоимостью и трудоемкостью последующей механической обработки износостойких покрытий.

При газоплазменном напылении расплавленные мелкие частицы материала, которые напыляют на основу, можно получить путем пропускания проволоки (порошкового шнура) или порошка через пламя (обычно кислородно-ацетиленовое). При распылении порошков всегда существует опасность ввода в газоплазменную струю избытка металла. Причиной неравномерности подачи порошка является отсутствие на сегодняшний день совершенной конструкции питателя. Газоплазменное напыление обеспечивает сравнительно невысокую производительность процесса, низкое качество покрытий из-за относительно невысоких скоростей напыляемых частиц и большого содержания окислов в покрытии. Температура плавления оксидов значительно выше температуры плавления их металлов поэтому крупные частицы порошка и вовсе не подплавляются. В процессе нанесения покрытия вследствие малых скоростей частиц и для предотвращения охлаждения частиц при транспортировке их на основу необходимо подносить горелку на близкое расстояние от детали, что вызывает термическое воздействие на деталь. Значительно ограничивают применение данного метода высокая стоимость самофлюсующихся порошков, трудоемкость обработки покрытия после оплавления, низкое теплосодержание струи и малый процент использования напыляемого материала. При использовании механических смесей порошков происходит сегрегация компонентов при смешивании, транспортировании из дозирующих устройств в струю, а также в процессе напыления. Сегрегация компонентов смесей приводит к неравномерности структуры покрытия, увеличению пористости, снижению прочности и ухудшению эксплуатационных характеристик покрытия. Распространение напыления гибкими шнуровыми материалами тормозится высокой стоимостью шнуровых материалов, необходимость в высокой энергии пламени для сжигания оболочки из органического материала.

Преимуществами электродуговой металлизации (ЭДМ) перед другими газотермическими способами является высокая производительность процесса, простота и доступность оборудования, отсутствие термического влияния на основу, технологическая пластичность относительно применения к различным типоразмерам деталей, небольшие эксплуатационные затраты, низкая себестоимость восстановления детали. Особенно эффективно ее применение при нанесении покрытий на крупногабаритные, тон-

костенные и длинномерные детали, на которых невозможно оплавление порошкового слоя, нанесенного газопламенным или плазменным методом, из-за их большой массы или коробления в процессе оплавления.

К недостаткам электродуговой металлизации следует отнести более низкую, чем при плазменном напылении, прочность сцепления покрытия с деталью, значительное выгорание легирующих элементов, повышенное окисление металла, высокая пористость покрытия, охлаждение распыляющим сжатым воздухом расплавленных частиц металла, в результате в покрытии могут появляться трещины и отслоения по причине наличия остаточных внутренних напряжений.

При разработке технологического процесса восстановления детали из всех возможных способов восстановления необходимо выбирать наиболее рациональный, обеспечивающий максимальный срок службы детали и наименьшую стоимость ее восстановления. При разработке технологических процессов и оборудования учитывают основные условия формирования качественных покрытий:

- термические воздействия на деталь должны полностью предотвращать фазовые или структурные превращения в основном металле;
- доля участия основного металла в покрытии должна быть близка к нулю;
- не должно быть реакций, способных изменить химический или фазовый состав покрытия по сравнению с исходным материалом;
- в зоне соединения не должны развиваться процессы релаксационного характера, способные изменить ее структуру и фазовый состав.

С позиции этих условий перспективно использование электродуговой металлизации.

#### **Методы активирования распыляющего потока**

Для предотвращения или регулирования образования окисного слоя вокруг частиц необходимо снижать парциальное давление кислорода в атмосфере распыления до достаточно низкого значения. Замена сжатого воздуха защитными газами (аргоном, азотом и др.) при напылении открывает широкие технологические возможности для получения покрытий практически без окислов с более высокими физико-механическими свойствами. Эта замена особенно существенна в случае нанесения покрытий из легкоокисляющихся материалов. Однако в связи с большим расходом распыляющего газа (от 1,0 до 1,5 м<sup>3</sup>/мин) при использовании электродуговых металлизационных аппаратов для нанесения покрытий применение относительно дорогостоящих инертных и защитных газов является экономически нецелесообразным.

Ослабить процессы окисления частиц при напылении возможно применением камер с контролируемой атмосферой, что ведет к значительным затратам на герметизацию и вентиляцию области напыления.

Для повышения основных эксплуатационных характеристик покрытий при напылении (прочность сцепления, пористость и др.) большое значение имеют скорость полета частиц и энергия соударения их с по-

верхностью. В этом плане выгодно отличается напыление при сверхзвуковых скоростях.

Применение восстановительных транспортирующих газов и использование профилированных сопел в ЭДМ для повышения скорости и концентрации потока позволяет получать защитные покрытия по качеству на уровне плазменных, что наряду с традиционными достоинствами ЭДМ делает этот процесс предпочтительнее плазменного.

Увеличить скорость и температуру струи транспортирующего газа и частиц, уменьшить диаметр капель, повысить плотность и снизить окисленность покрытия при электродуговой металлизации возможно за счет совершенствования газодинамических и физико-химических процессов (активирования).

Отличительной особенностью активированной дуговой металлизации (АДМ) по сравнению с традиционной электродуговой металлизацией является использование дополнительного источника тепловой энергии.

Известны следующие источники активирования распыляющего потока при ЭДМ:

1) газопламенными:

– продуктами сгорания жидкого топлива (например, бензина или керосина);

– продуктами сгорания пропано–кислородной смеси;

– продуктами сгорания пропано–воздушной смеси;

– продуктами сгорания ацетилено–кислородной смеси;

2) электрическими:

– с использованием джоулевого тепла, выделяемого при пропускании электрического тока через нагревательный элемент в виде ребер неплавящегося (третьего) электрода;

– с использованием энергии электрической дуги (нагрев плазменной дугой).

При активировании плазменной дугой возникает необходимость в дополнительном дорогостоящем оборудовании для обеспечения формирования стабильной мощной плазмы. При этом подобная активация не оказывает защитного воздействия на расплавленные частицы металла при их полете к основе.

Активирование нагревающимися ребрами неплавящегося электрода эффективна лишь при малых скоростях потока сжатого воздуха в орбитальном канале, тем самым не обеспечивается достаточная аэродинамическая сила для мелкодисперсного распыления плавящихся в электрической дуге проволок. К тому же максимальная температура, до которой возможно нагреть распыляющий газ невысока и не превышает температуры нагревательного элемента. При этом нагревательное устройство из-за низкого коэффициента теплоотдачи получается громоздким и его эффективный к.п.д. невысок.

Максимальные температуры распыляющего газа, которые могут быть достигнуты при использовании наиболее распространенных горючих

газов и жидких топлив, используемых при газопламенной обработке, а следовательно, и максимальные скорости газовой струи несколько различны. Однако различие параметров газовой струи для рассматриваемых топлив не превышает 5,5 %. Поэтому газовые струи при работе на этих топливах обладают практически равными технологическими возможностями и энергетическими характеристиками.

При активировании продуктами сгорания жидкого топлива фракционных состав жидкого топлива определяет качество распыления и полноту сгорания. Топливо со множеством тяжелых фракций при распылении образует более крупные капли, которые полностью не сгорают и попадают на покрытие.

При активировании продуктами сгорания пропано-кислородной смеси в качестве окислителя топлива выступает кислород, который сильно удорожает данный способ восстановления деталей. В случае использования в качестве окислителя кислорода, объем горючих газов, необходимый для образования единицы объема продуктов сгорания возрастает в несколько раз. Скорость струи при этом увеличивается незначительно.

Активирование распыляющего потока путем сжигания пропано-воздушной смеси является наиболее эффективной. Газообразные топлива имеют ряд преимуществ по сравнению с жидкими. Они относительно дешевы, легко смешиваются с воздухом, а отработавшие газы малотоксичны. Пропан характеризуется высоким коэффициентом объемного расширения: при повышении температуры на 10 °С давление в газовом баллоне повышается на 0,6-0,7 МПа. По энергетическим параметрам 1 м<sup>3</sup> природного газа эквивалентен 1 л бензина. Низкая себестоимость покрытия обеспечивается отсутствием дорогостоящего окислителя (кислорода). Высокая аэродинамическая сила продуктов горения пропано-воздушной смеси, вылетающих из камеры сгорания, позволяет разгонять расплавленные частицы до высоких скоростей.

### **Материалы для электродуговой металлизации**

При дуговом способе напыления в качестве напыляемого материала (металла или сплава) используется проволока диаметров 0,8; 1; 1,6; 2 мм. Использование проволоки позволяет осуществлять непрерывную и равномерную подачу напыляемого материала в высокотемпературную зону металлизатора, что повышает устойчивость процесса напыления и качество получаемого покрытия. Износостойкость обеспечивается при использовании проволок из углеродистой, низко- и высоколегированной стали. Для восстановления размеров рабочих поверхностей деталей работающих в условиях трения при граничной смазкой (коленчатый вал, распределительный вал и др.) оптимальным материалом является проволока Нп-40Х13, для деталей с изношенной поверхностью посадки подшипника обосновано применение проволоки Нп-65Г.

АДМ в 1,3–1,4 раза экономичнее ЭДМ при одновременном увеличении в 1,3–1,4 раза срока службы восстановленной детали.

## **Заключение**

Наибольшую долю из восстанавливаемых деталей автомобилей, тракторов и сельскохозяйственных машин составляют детали типа «круглые стержни».

Наибольшее распространение, из числа известных методов нанесения износостойких покрытий, для восстановления размеров изношенных поверхностей деталей приобрели различные способы наплавки, газотермического напыления и гальванирования. Несмотря на широкое распространение, способы нанесения покрытий перечисленными способами, с одной стороны, обладают рядом недостатков, а с другой, сами покрытия в ряде случаев не удовлетворяют тому комплексу требований, которые к ним предъявляются.

Наиболее универсальным и приемлемым является способ активированной дуговой металлизации с активированием распыляющего потока продуктами сгорания пропано-воздушной смеси, как наиболее проработанный с производственной точки зрения и экономически эффективный.

Для восстановления размеров рабочих поверхностей деталей работающих в условиях трения при граничной смазкой оптимальным материалом является проволока Нп-40Х13, для деталей с изношенной поверхностью посадки подшипника – Нп-65Г.

УДК 621.81.004.67  
631.3.004.67

## **ФОРМИРОВАНИЕ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ Al-Fe ПОКРЫТИЙ ПЛАЗМЕННО-ВАКУУМНЫМ НАПЫЛЕНИЕМ**

*Лойко В.А., к.т.н., доцент; Семин Е.В.; Кучинский А.П.; Кулиш Е.С.  
УО «Белорусский государственный аграрный технический  
университет», г. Минск*

*Процессы нанесения защитных покрытий и методы поверхностного модифицирования нашли широкое применение в общем и сельскохозяйственном машиностроении для улучшения поверхностных характеристик ответственных деталей. Нанесение покрытий из алюминия традиционно применяется для защиты от коррозии деталей оборудования пищевого и перерабатывающего производств. Однако механические характеристики иллюминированных поверхностей не достаточны для промышленной эксплуатации в перерабатывающей отрасли. Поэтому исследование процессов формирования на поверхностях изделий из железа интерметаллидных слоев Al-Fe представляется важным и перспективным.*

Расширение использования алюминия как конструкционного материала в высокотехнологичных изделиях сдерживается низкими поверхностными