

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС НАНЕСЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ ЭНЕРГИИ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

Акулович Л. М., д.т.н., профессор, Миранович А. В., ст. преподаватель
Белорусский государственный аграрный технический университет
г. Минск, Республика Беларусь

Известно [1], что формирование покрытий на поверхности изделий с использованием установок ЭМН происходит в рабочей зоне – пространстве, ограниченном полусными наконечниками и деталью, в котором образуется многоэлектродная система из зерен ферропорошка в результате воздействия на них комбинированного электромагнитного поля. Рабочая зона установок ЭМН образуется магнитной системой, представляющей собой совокупность источников электрического и магнитного полей с магнитопроводами. При этом формирование комбинированного электромагнитного поля в рабочем зазоре обеспечивается сочетанием контура наплавки и внешнего электромагнитного поля.

Так, электромагнитное поле наплавочного контура создается током наплавки, проходящим по цепочкам-микроэлектродам в рабочем зазоре и током, протекающим по основному металлу изделия. Направления силовых линий в обоих случаях совпадают, согласно принципу суперпозиции, и индукция электромагнитного поля наплавочного контура составляет

$$B_H = B_{\text{ц}} + B_M,$$

где $B_{\text{ц}}$, B_M – индукция электромагнитного поля, создаваемого соответственно током, проходящим по цепочкам-микроэлектродам, и током, протекающим по основному металлу изделия, Тл.

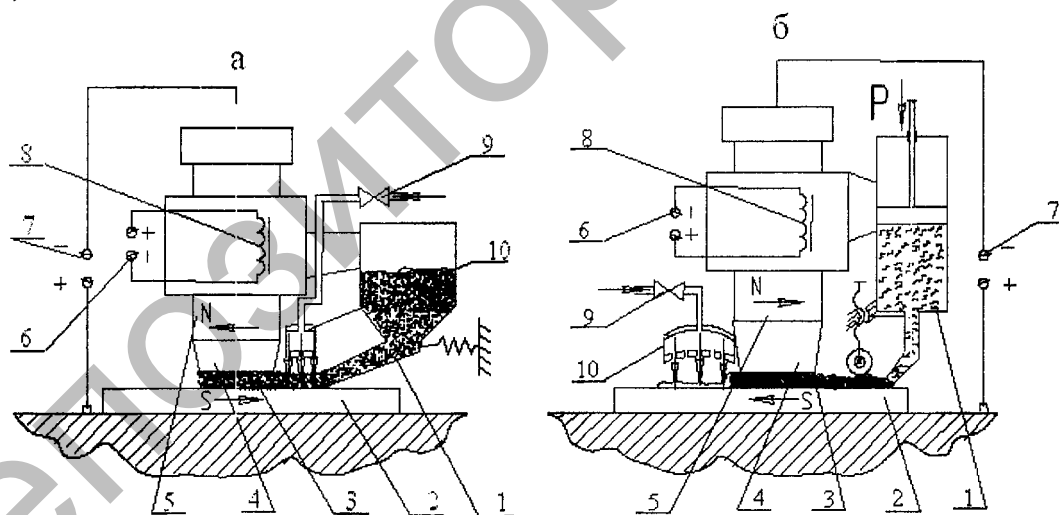


Рисунок 1 – Схемы ЭМН ферропорошка в составе смазочно-охлаждающей жидкости (а) и в составе пасты (б) на плоские поверхности деталей машин: 1 – бункер-дозатор; 2 – изделие; 3 – ферропорошок; 4 – полюсный наконечник; 5 – сердечник; 6 – источник питания электромагнита; 7 – источник технологического тока; 8 – электромагнитная катушка; 9 – кран; 10 – спрейер

Согласно закону Био-Саварра, индукция электромагнитного поля проводника с током определяется по формуле

$$B = \mu \frac{I}{2\pi l},$$

где I – ток наплавки, А; l – расстояние от проводника с током (сердечника с полюсным наконечником) до изделия, м; μ – магнитная проницаемость среды, Гн/м.

Индукция электромагнитного поля наплавочного контура на расстоянии от поверхности изделия в этом случае описывается следующей зависимостью:

$$B_H = \mu\mu_0 \left(\frac{I}{2\pi l_{\text{ц}}} + \frac{I}{2\pi l_{\text{м}}} \right), \quad (1)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, равная $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; $l_{\text{ц}}$ – расстояние рассматриваемой точки от цепочек-микроэлектродов, по которым проходит ток наплавки, м; $l_{\text{м}}$ – расстояние рассматриваемой точки по отношению к составляющей тока, протекающего по основному металлу изделия, м.

Согласно (1), индукция электромагнитного поля наплавочного контура увеличивается при повышении тока наплавки и приближении к поверхности изделия проводника с током, т.е. полюсного наконечника.

Как известно, распределение индукции в рабочем зазоре по торцу полюсного наконечника зависит от источника внешнего магнитного поля (переменного, импульсного или постоянного). В установках ЭМН в основном используются электромагниты на выпрямленном или переменном (пульсирующем) токе, которые позволяют получать периодически изменяющуюся во времени величину магнитной индукции

$$B_{\text{э}} = B_{\text{м}} \sin \omega t, \quad (2)$$

где $B_{\text{э}}$, $B_{\text{м}}$ – мгновенная и максимальная величины магнитной индукции в рабочем зазоре, Тл; $\omega = 2\pi f$ – круговая частота, Гц; t – время, с.

Бесступенчатое регулирование магнитного поля осуществляют за счет изменения величины тока в электромагнитной катушке. При этом индукция поля, создаваемого электромагнитом в рабочем зазоре, определяется по зависимости [3]

$$B_{\text{э}} = \frac{I \omega_{\text{п}} \mu_{\text{ст}} \mu_0}{\mu_{\text{ст}} \delta + l_{\text{ср}}},$$

где I – сила тока электромагнитной катушки, А; $\omega_{\text{п}}$ – число витков катушки; $\mu_{\text{ст}}$ – относительная магнитная проницаемость стали, Гн/м; δ – рабочий зазор, м; $l_{\text{ср}}$ – длина средней магнитной линии, равная суммарной длине участков стали магнитопровода, м.

Установлено [2], что для эффективных электромагнитных воздействий на расплав капель ферропорошка и, соответственно, обеспечения благоприятных условий формирования покрытий на изделиях необходимо получение равномерного распределения градиента индукции и стабильной величины временных характеристик магнитного поля в рабочем зазоре. При этом в процессе ЭМН управляющим воздействием в рабочей зоне является внешнее электромагнитное поле, которое при взаимодействии с электрическим полем тока наплавки создает силы, определяющие движение капель расплава ферропорошка и расплавленного металла изделия в микролунке. Так, электромагнитные силы воздействуют на легкодеформируемые жидкие и газообразные зерна ферропорошка, изменяя их геометрические формы и движение в рабочем зазоре, определяют производительность процесса наплавки и качество формируемого покрытия. Известно, что на цепочки-микроэлектроды, выстроенные вдоль магнитных силовых линий, воздействуют:

▪ сила, действующая на зерна порошка со стороны более удаленных зерен в направлении вектора $\text{grad}\vec{B}$, которая определяется зависимостью

$$F_M = - \sum_{i=1}^n \frac{4 \mu a_i^2 b_i K H_i}{3 R_i + \delta}, \quad (3)$$

где n – число зерен в цепочке; R_i – расстояние от границы i -го зерна до оси упрочняемой поверхности, м; a_i, b_i – размеры большой и малой осей эллипсоида, м; μ – магнитная проницаемость материала ферропорошка, Гн/м; K – магнитная восприимчивость материала ферропорошка, Гн/м; H_i – напряженность магнитного поля у верхней границы зерна, А/м; δ – величина рабочего зазора, м;

▪ магнитная сила, вызванная взаимодействием молекулярных токов материала зерна ферропорошка с внешним полем

$$F_{M1} = \frac{1}{\mu_0} V B \text{grad}\vec{B},$$

где V – объем ферропорошка, м³; B – магнитная индукция в точке рабочего зазора, где расположено зерно, Тл; $\text{grad}\vec{B}$ – вектор градиента магнитной индукции в рассматриваемой точке рабочего зазора;

▪ магнитная сила, вызванная стремлением зерна ферропорошка сориентироваться вдоль силовых линий магнитного поля

$$F_{M2} = \left(\frac{M_M}{a} \right) \sin \theta,$$

где M_M – момент магнитных сил, действующий на зерно ферропорошка, Н·м; a – длина наибольшей оси зерна, м; θ – угол между направлением наибольшей оси зерна и силовыми линиями внешнего магнитного поля, град.;

$$M_M = \rho S^* a M^* \sin \theta,$$

где $\rho = B^2 / 2\mu_0$, – магнитное давление на единичную площадку поверхности зерна, Тл²·м/Гн; S^* – площадь среднего поперечного сечения эллипсоида, м²; M^* – коэффициент;

▪ сила электромагнитного поля тока наплавки

$$F_{M3} = I B_n \ell_n,$$

где ℓ_n , – длина наплавочного контура, м.

Анализ параметров зависимости (3) при их взаимодействии показывает, что величина магнитной индукции оказывает влияние на интенсивность образования цепочек-микроэлектродов и их электрическую проводимость. Переменный характер магнитной индукции на границах участков с различным магнитным сопротивлением способствует хаотичному распределению ферропорошка в рабочем зазоре. В результате градиент магнитной индукции $\text{grad}\vec{B}$ на отдельных участках рабочего зазора изменяется с частотой образования разрядных цепочек из зерен ферропорошка. При таких условиях согласно (4) магнитная сила F_M , удерживающая цепочки-микроэлектроды в рабочей зоне, будет неодинакова для зерен ферропорошка. По этой причине важно было дать оценку влияния временных характеристик электромагнитного поля и распределения индукции в рабочем зазоре на процесс формирования покрытий на поверхности изделия.

Для этого проведены исследования распределения индукции внешнего магнитного поля в рабочей зоне установок ЭМН с электромагнитами для схем (рисунок 1, а и б). Питание электромагнитных катушек в первом случае осуществлялось от сети переменного

тока промышленной частоты, а во втором – от выпрямителя, обеспечивающего частоту магнитного поля 0,5 ... 12,5 Гц (рисунок 2, а).

Измерения выполняли теслаамперметром Ф4354/1 и специальными щупами с датчиками Холла, имеющими размеры 80×5,0×0,8 мм, установленными на краях и в центре рабочего зазора. По изменению величины индукции в различных точках оценивали интенсивность магнитного поля в рабочей зоне. Анализ результатов эксперимента показывает, что знакопеременные магнитные поля (частотой $\nu=0,5$, $\nu=12,5$ и $\nu=50$ Гц, индукцией в рабочей зоне $B = 0,5 \dots 0,9$ Тл) не достаточно однородны (рисунок 2, б, в, и г), что вызывает поперечные колебания и миграцию не только цепочек-микроэлектродов в рабочем зазоре, но и дуговых разрядов. При этом процесс наплавки происходит неустойчиво с короткими замыканиями и одиночным пульсирующим горением цепочек ферропорошка в рабочем зазоре. Это обстоятельство не обеспечивает качественного покрытия на плоских поверхностях деталей машин (шероховатость поверхности – Ra , пористость – Π , толщина нанесенного покрытия – t и др.).

Известно [5], что на электрическое поле контура наплавки действуют внешние управляемые продольные и поперечные магнитные поля. При этом продольное магнитное поле удерживает цепочки-микроэлектроды ферропорошка в рабочем зазоре, придает им требуемую жесткость и устойчивость. Поперечное магнитное поле обеспечивает вращательное движение капель расплава ферропорошка с заданным эксцентриситетом вдоль магнитных силовых линий. Так, при совпадении поперечного и электрического полей создается избыточное магнитное давление и происходит отклонение дуговых разрядов в сторону более слабого поля [6, 7]. Исключить этот недостаток возможно следующими методами:

- использованием вращающегося поперечного магнитного поля;
- шунтированием магнитного потока рассеяния в рабочей зоне;
- изменением полярности тока наплавки (например, с прямой на обратную);
- уменьшением остаточной и наведенной намагниченности изделий, т.е. выполнением демагнитизации;
- использованием оптимальной конструкции магнитной системы.

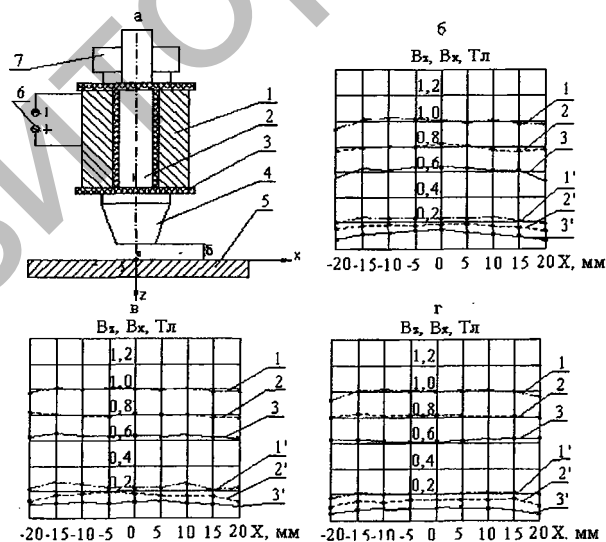


Рисунок 2 – Электромагнитная система установки ЭМН (а): 1 – обмотка; 2 – сердечник; 3 – изолятор; 4 – полюсный наконечник; 5 – изделие; 6 – источник питания; 7 – оправка; распределение продольной B_z и поперечной B_x составляющих магнитной индукции в рабочем зазоре ($\delta = 2,0$ мм) для электрических магнитов с частотой $\nu=50$ Гц (б), $\nu=12,5$ Гц (в) и $\nu=0,5$ Гц (г) при силе тока электромагнитной катушки: 1 – 3,5 А; 2 – 2,5 А; 3 – 1,5 А; X – расстояние от продольной оси полюсного наконечника

Наиболее эффективным направлением устранения вышеуказанных недостатков является использование комбинированных внешних магнитных полей, которые при взаимодействии с током наплавки создают электромагнитные силы, позволяющие управлять качеством наплавленных покрытий. Для исключения колебаний цепочек-микроэлектродов ферропорошка в рабочем зазоре перспективно использовать системы с постоянными магнитами. При использовании постоянного магнитного поля в рабочей зоне возможно получение стабильной во времени величины индукции и, соответственно, более однородного распределения магнитного потока по торцу полюсного наконечника. Это технологическое решение позволяет отказаться от источника питания с переменными или импульсными электрическими магнитами, упростить конструкцию установки ЭМН, исключить необходимость в герметизации катушек от попадания смазочно-охлаждающей жидкости, уменьшить габаритные размеры и массу.

Поскольку реальные электромагнитные системы, применяемые при ЭМН, не являются осесимметричными, отклонения дуговых разрядов в рабочем зазоре от оси полюсного наконечника неизбежны. Так, стабильность процесса ЭМН нарушается в том случае, если на цепочки-микроэлектроды ферропорошка в рабочем зазоре действуют поперечные магнитные поля, которые способствуют отклонению дуговых разрядов и их последующему обрыву. Для устранения этого обстоятельства используют продольные боковые магнитные поля [8, 9], направление и величина индукции которых зависит от конструкции магнитной системы. Эти магнитные поля оказывают сжимающее действие на наплавочную дугу и при отклонении ее поперек наплаваемой поверхности возвращают в центр рабочего зазора. Продольные боковые поля оказывают стабилизирующее действие на дугу в рабочей зоне.

В результате принятых технологических решений изготовлено устройство для ЭМН плоских поверхностей [10], содержащее магнит с сердечником в виде вращающейся оправки, диск с бункерами и дозирующими втулками, электроды для подачи ферропорошка и, снабженное двумя постоянными магнитами Е-образной формы, расположенными перпендикулярно друг к другу и закрепленными в корпусе на немагнитном основании параллельно поверхности обрабатываемой детали. При этом сердечник устройства с полюсным наконечником установлен в центральной части магнитов с возможностью регулирования величины магнитной индукции в рабочей зоне посредством изменения расстояния между постоянными магнитами, снабженными боковыми полюсными наконечниками.

В настоящее время для изготовления новых запасных частей и деталей машин необходимо в 2 ... 4 раза больше операций обработки, чем при восстановлении и упрочнении идентичных. При этом основное преимущество упрочнения и восстановления изделий – это низкая металлоемкость производства, для которого необходимо в 20 ... 30 раз меньше металла, по сравнению с изготовлением новых запасных частей. Однако восстановление и упрочнение является более сложной проблемой по сравнению с изготовлением новых изделий.

Зачастую изготовленные детали машины имеют повышенную металлоемкость, обусловленную отсутствием сведений об износостойкости и надежности основных узлов и механизмов, а также вследствие использования дорогостоящих и неоптимальных материалов и покрытий при их изготовлении. В этих случаях эффективно применение износостойких покрытий с заданными триботехническими свойствами. При этом повышение долговечности и надежности деталей подвижных сопряжений машин, их рабочих органов является одной из наиболее актуальных задач в развитии машиностроительного и ремонтного производств.

Анализ результатов комплексных исследований износа и долговечности конструкционных материалов посадочных мест валов коробки передач автомобилей семейства КамАЗ при различных видах изнашивания – гидроабразивном, в условиях контактной усталости (подшипники качения), при трении скольжения (опоры скольжения) показывает,

что величина износа составляет 0,2 ... 0,8 мм. Для восстановления геометрических размеров изношенных посадочных поверхностей вторичных валов, а также для упрочнения новых деталей разработан способ нанесения высокопрочных покрытий композиционными порошками на железной основе в комбинированных физических (постоянном магнитном, электрическом и тепловом) полях с предварительной и окончательной поверхностной пластической деформацией (ППД). Сущность процесса заключается в предварительной пластической деформации обрабатываемой поверхности, последующей электромагнитной наплавки (ЭМН) и ППД нанесенного покрытия. Этот способ обеспечивает пластическим деформированием уплотнение и выравнивание не только наплавленного слоя покрытия, но и обработанной поверхности вала после механической обработки перед ЭМН. В результате этого значительно улучшается качество покрытия, повышается его плотность, изменяется микро топография, обеспечивается отсутствие существенного нагрева как зерен порошка, так и обрабатываемого изделия.

В результате комбинированной обработки (предварительное ППД поверхности, ЭМН порошка Fe-2%V, ППД наплавленного слоя) посадочных мест вторичных валов коробок передач автомобилей КамАЗ структура упрочненного слоя имела свои особенности: достаточно высокая плотность и однородность покрытия, наличие своеобразной “зеренной” структуры с мелкими (менее 0,1 мкм) порами по границам зерен и ячеек, т.е. отсутствует дендритно-столбчатое строение покрытия; отсутствует четко выраженная поверхность раздела между покрытием и основой, наличие которой характерно при ЭМН без ППД; образование более развитого диффузионного слоя, в котором происходят превращения, соответствующие полной закалке; увеличивается протяженность зоны термического влияния и более глубоко развиваются в ней фазовые превращения как в феррите, так и в перлите. Пористость не превышает 5%.

Для микроструктуры покрытия характерно образование малоуглеродистого мартенсита и наличие структурно-свободного δ -феррита, особенно в участках, прилегающих к основе. На самой границе с основой со стороны покрытия образуется тонкий слой со структурой полной закалки, что связано с диффузией углерода из поверхности основы в жидкую фазу покрытия. На границе системы покрытие-основа образуется диффузионная зона путем диффузии ванадия в аустенит основы, образующийся при нагреве, и его последующей фазовой перекристаллизации с образованием мартенсита.

Исследования в условиях производства ОАО «Вилейская райагропромтехника» предусматривали сравнительные испытания износостойкости посадочных мест под подшипники качения вторичных валов коробок передач автомобилей семейства КамАЗ. Сравнивали валы, изготовленные по типовой технологии и упрочненные комбинированной обработкой. Количество километров пробега автомобилей составило 5000 ... 6000. В процессе испытаний установлено, что интенсивность изнашивания посадочных мест, изготовленных по типовой технологии и технологии упрочнением комбинированной обработкой, составила соответственно: 8,2 ... 10,1 мкм/1000 км и 5,7 ... 6,9 мкм/1000 км.

Полученные результаты исследований показывают, что использование данного способа упрочнения и восстановления позволяет снизить пористость покрытия до 3-6 %, уменьшить износ посадочных мест под подшипники качения валов в 1,5 ... 2,0 раза по сравнению с заводской технологией и обеспечить устойчивость и стабильность процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ракомсин, А. П. Упрочнение и восстановление изделий в электромагнитном поле / Под ред. П. А. Витязя. – Мн.: Парадокс, 2000. – 201 с.
2. Мрочек, Ж. А. Использование постоянных магнитов в устройствах электромагнитной наплавки // Теория и практика машиностроения. – 2004. – № 3. – С. 75 – 84.

3. Акулович, Л.М. Термомеханическое упрочнение деталей в электромагнитном поле. – Полоцк: ПГУ, 1999. – 240 с.
4. Василевский, И. Н. Повышение эксплуатационных свойств деталей машин наплавкой паст в электромагнитном поле / И. Н. Василевский и др. // Агропанорама. – Мн., 2003. – № 4. – С. 11 – 12.
5. Постоянные магниты: Справочник / А. Б. Альтман, Э. Е. Верниковский, А. Н. Герберг и др.; Под ред. Ю. М. Пятина. – М.: Энергия, 1980. – 488 с.
6. Арнольд, Р. Р. Расчет и проектирование магнитных систем с постоянными магнитами. – М.: Энергия, 1969. – 184 с.
7. Иродов, И. Е. Основные законы электромагнетизма: Учеб. пособие для студентов вузов. – М.: Высшая школа, 1991. – 288 с.
8. Теория сварочных процессов / Волченко В. Н., Ямпольский В. М., Винокуров В. А. и др.; Под ред. В. В. Фролова – М.: Вышш. шк., 1988. – 559 с.
9. Пустовойт, С. В. Совершенствование дуговой сварки электромагнитными методами // Автоматическая сварка. – К., 2000. – № 1. – С. 39 – 42.
10. Корольков, П. М. Причины возникновения магнитного дутья при сварке и способы его устранения // Сварочное производство. – М., 2004. – № 3. – С. 38 – 40.

Аннотация

Технологический процесс нанесения защитных покрытий с использованием электрических разрядов энергии постоянных магнитов

В статье рассматриваются технологические методы упрочнения и восстановления деталей автотракторной техники в электрическом и магнитном полях.

Abstract

Technological process of drawing of sheetings with use of electric categories of energy of constant magnets

In article technological methods of hardening and restoration of details of autotractor technics in electric and magnetic fields are considered..

УДК 621.793.7

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ ИЗБИРАТЕЛЬНОГО ПЕРЕНОСА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ ЦАР ТРЕНИЯ К ВОДОРОДНОМУ ИЗНАШИВАНИЮ

Зеленин В.А., д.т.н., **Маршина Е.А.**, аспирант
*Белорусский государственный аграрный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь*

Введение. «Трение – удивительный феномен природы! Оно подарило человечеству тепло и огонь, возможность в короткое время остановить скоростной поезд и автомо-