

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

УДК 621.791

А.М. Авсиевич, Н.В. Спиридонов, В.М. Константинов, С.А. Гришанов

НАНЕСЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКИХ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ИЗ ДИФфуЗИОННО ЛЕГИРОВАННЫХ САМОФЛЮСУЮЩИХСЯ (ДЛС) ПОРОШКОВ НА ЖЕЛЕЗНОЙ ОСНОВЕ

Белорусская государственная политехническая академия

Минск, Беларусь

Полоцкий государственный университет

Новополоцк, Беларусь

Для технологии газотермического осаждения покрытий остается актуальной задача снижения себестоимости при улучшении качества. На сегодняшний день при нанесении покрытий наиболее широко и эффективно используются два типа самофлюсующихся порошковых материалов: на никелевой и на железной основе. Первые обладают высокими технологическими свойствами и обеспечивают хорошее качество покрытий. Вторые имеют в 2–3 раза меньшую стоимость, но и меньшую технологичность – повышенную температуру плавления и низкую пластичность. Устранить эти недостатки железных порошков можно, модифицируя их химический состав.

В течение последних лет в Полоцком государственном университете (ПГУ) разрабатываются диффузионно-легируемые самофлюсующиеся порошки (ДЛС-порошки) на железной основе, предназначенные для нанесения покрытий методом наплавки [1]. Технология диффузионного насыщения позволяет эффективно управлять химическим составом порошковых материалов. В ПГУ разработана гамма порошков с различным содержанием легирующих элементов и изучено влияние их химического состава на физико-механические характеристики и эксплуатационные свойства наплавленных покрытий при различных условиях изнашивания [2,3]. Разработка новых и апробация уже имеющихся ДЛС-порошков для нанесения покрытий газотермическим осаждением открывает широкие возможности для значительного удешевления данной технологии. Высокая экономическая эффективность использования таких материалов обусловливается тем, что при их изготовлении могут широко использоваться отходы производства.

Целью проводимых исследований является изучение процессов, происходящих при газотермическом напылении диффузионно легируемых порошков от момента начала разогрева частицы в высокоэнергетической струе до формирования покрытия, физико-механических и эксплуатационных свойств полученных покрытий.

Установлено, что наилучшей технологичностью обладают ДЛС-порошки на основе стружки серого и высокохромистого чугунов как имеющие меньшую относительно стальных температуру плавления. Наиболее высокими коэффициентом использования материала и производительностью характеризуется порошок на основе высокохромистого чугуна, что объясняется сферической формой его частиц, являющихся отходами электроэрозионной обработки. При диффузионном насыщении исходные порошки насыщались бором и медью.

Так как процесс осаждения покрытий является быстро протекающим и не поддается экспериментальным методам изучения, были математически смоделированы тепловые процессы в ДЛС-частице, разгоняемой в плазменной струе. Изучение динамики нагрева и остывания частиц включает в себя расчет температурного поля и скорости частиц. В расчетах, выполненных на основе разработок [4,5], учитывалась двухфазность частиц. Принималось, что легированный слой поверхности представляет собой сплошную боридную фазу, а сердцевина – железо, а такое допущение соответствует реальной ДЛС-частице. Принималось, что осаждение покрытий происходит в струе азотной плазмы при силе тока 200 А.

В результате моделирования установлено, что при одинаковых размерах двухфазная частица, по сравнению с однофазной, медленнее нагревается и медленнее остывает, однако, максимальная температура разогрева для однофазной частицы несколько выше. До наиболее высоких температур разогреваются частицы грануляцией 100–120 мкм за счет достаточно долгого нахождения в горячей части струи. ДЛС-частицы любой грануляции успевают разогреться выше температуры плавления. Установлено, что оптимальная дистанция осаждения покрытия составляет 90–120 мм, когда частица будет обладать высокой температурой и, следовательно, активацией, но поверхностный слой ее уже перейдет в твердое состояние, что предотвратит разбрызгивание.

Перегрев частиц выше $T_{\text{уд}}$ делает необходимой оценку диффузионных процессов в ней. Установлено, что при нахождении частицы в расплавленном состоянии, согласно расчетам, 1–2 миллисекунды, диффузионный путь атомов бора при свободном перемещении его в расплаве не превышает 5 мкм. А свободно могут перемещаться только атомы, находящиеся наиболее близко к центру частиц. Таким образом, гомогенизация по бору находится в начальной стадии, и теплофизические свойства поверхности в основном соответствуют свойствам борида. Данные выводы подтверждаются результатами исследования структуры.

Структура покрытий из ДЛС-порошка высокохромистого чугуна характеризуется значительной степенью неоднородности как внутри отдельных частиц, так и по покрытию в целом, что благоприятно для триботехнических свойств покрытий. Многие частицы в большей или меньшей мере сохраняют структуру, полученную при диффузионном насыщении. Помимо неполной гомогенизации неоднородность объясняется неодинаковостью теплового взаимодействия ДЛС-частицы с окружающей сре-

дой в процессе осаждения покрытия и застывания. Увеличение силы тока и дополнительное легирование медью способствуют увеличению времени остывания частиц и некоторому выравниванию структуры. Фотография напыленного плазмой покрытия из ДЛС-порошка приведена на рис. 1.



Рис. 1. Поверхность покрытия ДЛС-порошка высокохромистого чугуна после плазменного напыления $\times 200$

Отличия в строении ДЛС-частиц определяют особенности процесса формирования прочного сцепления с основой при их осаждении.

Из-за значительно меньшей теплопроводности боридной фазы для ДЛС-частицы по сравнению с однофазной железной характерна в 4–5 раз меньшее превышение температуры в контакте при застывании над температурой подложки (рассчитана по методике В.В. Кудинова). Время отвердевания наоборот больше, но оно определяется порядком 10^{-4} с. Следовательно температура контакта $T_{\text{к}}$ и определяемая ею активация поверхности контакта сильно зависят от разогрева подложки, тогда как для однофазных железных порошков при осаждении покрытия на железную же подложку T° контакта $\gg T^{\circ}$ частицы в момент удара.

Высокая концентрация бора в частицах материала покрытия предполагает протекание реакции раскисления поверхности подложки. Проведен расчет степени протекания данной реакции. Установлено, что при формировании покрытия она мала, но резко интенсифицируется с увеличением температуры контакта и достаточно полно протекает за несколько часов при температуре около 800°C . Все это создает резерв для увеличения величины адгезии покрытия к основе.

На адгезию в значительной мере могут повлиять остаточные напряжения после осаждения покрытий. В результате экспериментальных исследований установлено,

что ввиду близости механических свойств материалов покрытия и подложки, осаждение ДЛС-порошков на основе высокохромистого чугуна приводит к незначительному изменению напряженного состояния, сформировавшегося после дробеструйной обработки: в образцах несколько увеличиваются напряжения сжатия, что не является критическим для адгезионной прочности.

Результаты экспериментальных исследований прочности сцепления покрытий из ДЛС-порошков приведены на рис. 2. Установлен факт увеличения адгезии в два раза с ростом силы тока от 200 А до 300 А и такой же рост адгезии с увеличением температуры подложки от 200° С до 500° С. Данный факт подтверждает предположение о высокой степени зависимости исследуемого параметра от разогрева частиц и возможности значительного увеличения адгезионной и когезионной прочности покрытий при большей величине тепловложения как в частицу, так и в поверхность подложки. Все это может быть объяснено не только дополнительной активацией поверхности, но и частичным связыванием адсорбированных поверхностных пленок бором.

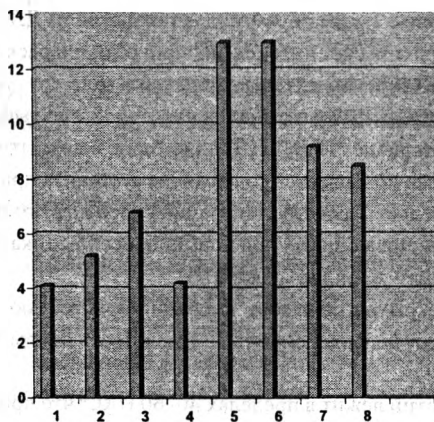


Рис. 2. Прочность сцепления покрытий из ДЛС-порошков при плазменном напылении:

1 – “ЧХ+В” : $I=200$ А, $L=95$ мм, $T_{\text{н}} = 200$ °С

2 – “ЧХ+В+Сu” : $I=200$ А, $L=95$ мм, $T_{\text{н}} = 200$ °С

3 – “СЧ+В+ Сu” : $I=200$ А, $L=95$ мм, $T_{\text{н}} = 200$ °С

4 – “ЧХ+В+Сu” : $I=200$ А, $L=130$ мм, $T_{\text{н}} = 200$ °С

5 – “ЧХ+В+Сu” : $I=300$ А, $L=95$ мм, $T_{\text{н}} = 200$ °С

6 – “СЧ+В+ Сu” : $I=300$ А, $L=95$ мм, $T_{\text{н}} = 200$ °С

7 – “ЧХ+В+Сu” : $I=200$ А, $L=95$ мм, $T_{\text{н}} = 500$ °С

8 – “ЧХ+В+Сu” : $I=200$ А, $L=95$ мм, $T_{\text{н}} = 200$ °С, с подслоем

Заметное влияние на рост прочности сцепления оказывает пластификация поверхности контакта. За счет добавки в поверхностный слой меди она увеличивается на 30%, а при осаждении подслоя из никель-алюминиевого порошка – на 70%.

ДЛС-порошки на железной основе уступают по прочности сцепления никелевым самофлюсам (соответственно 5 и 10 МПа при силе тока 200 А), но превосходят объемно легированный железный порошок ПР-Х4Г2Р4С2 (4,2 МПа).

Установлено, что эффективным методом увеличения адгезии является последующая термообработка покрытий, активизирующая реакцию раскисления подложки и диффузию бора. И при оплавлении газовой горелкой, и при выдержке в печи (3 часа при $t = 950-1000^{\circ}\text{C}$) прочность сцепления оказалась одинаковой и составила около 35 МПа. Наблюдалось разрушение образцов по покрытию. Структура поперечного среза по-разному термообработанных покрытий для слоев вблизи подложки также весьма сходная. Оплавилась только насыщенная боридами поверхность, в результате резко увеличилась поверхность контакта между частицами и между покрытием и подложкой. Соответствующие границы стали менее различимы по сравнению с покрытием, уменьшилась пористость. Таким образом, для покрытий из ДЛС-порошков увеличение прочности сцепления за счет интенсификации реакции раскисления поверхности контакта происходит в широком интервале температур.

Рентгеноструктурным фазовым анализом установлено высокое содержание аустенита в исходном материале “ИЧХ” (56 %), которое в покрытиях увеличивается до 60–80%. Наиболее резко повышается содержание аустенита при дополнительном легировании порошка медью. Также аустенизации способствуют высокие скорости охлаждения частиц, увеличивающиеся при повышении силы тока осаждения. Содержание упрочняющей фазы – боридов – около 5%.

Исследуемые покрытия обладают высокой пористостью – 10–20%. Меньшие значения соответствуют большей силе тока. Пористость покрытий после оплавления составляет 3–8%.

Твердость покрытий лежит в пределах 40–60 HRC, что примерно соответствует уровню твердости покрытий из никелевых самофлюсов.

Имеет место большой разброс значений микротвердости – от 5000 до 11000 МПа, обусловленный структурной неоднородностью покрытий. Присутствие меди и увеличение силы тока осаждения повышает содержание γ -фазы и снижает среднюю твердость покрытия. После оплавления наоборот характерно некоторое увеличение микротвердости.

Экспресс испытания износостойкости показывают, что работоспособность покрытий из ДЛС-порошков и никелевых самофлюсов в условиях сухого трения и трения в смазке находятся примерно на одном уровне. При граничном тернии образца с покрытием в паре с контртелом из стали, закаленной до 60 HRC, износ покрытия и контртела также был примерно одинаков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ворошнин Л.Г., Пантелеенко Ф.И., Константинов В.М. Теория и практика получения защитных покрытий с помощью ХТО. – Минск: ФТИ; Новополоцк: ПГУ, 1999. – 133 с. 2. Пантелеенко Ф.И., Константинов В.М. Исследование износостойкости борсодержащих эвтектических покрытий ДЛС-порошков. // Трение и износ. – 1994. – Т. 15 – № 2. С. 243–247. 3. Константинов В.М., Пантелеенко Ф.И., Иванов В.П. Абразивная износостойкость покрытий из ДЛС-порошков // Трение и износ. – 1996. – Т. 17, № 4. С. 508–512. 4. Компьютерное моделирование процессов плазменного напыления покрытий / С.П. Кундас, А.П. Достанко, А.Ф.Ильющенко, А.Н.Кузьменков, E.Lugscheider, U. Eritt. – Мн.: Бестпринт, 1998. – 212 с. 5. Гуревич В.А. Кашко Т.А., Левашкевич Я.С., Кундас С.П. Математическая модель процесса плазменного напыления покрытий // Физика конденсированных сред: Тезисы докл. VIII Респ. науч. конф. студентов и аспирантов / Под ред. В.А. Лиопо.– Гродно: ГГУ, 2000.– С. 85–86.

УДК 621.723

Л.М. Акулович, Миранович А.В., Тризна В.В.

ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОЛЮСНЫХ НАКОНЕЧНИКОВ В УСТРОЙСТВАХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ НАПЛАВКИ

*КТИ СМА с ОП, Белорусский государственный аграрный технический университет
Минск, Беларусь*

Актуальной задачей современного машиностроительного и ремонтного производства является повышение надежности и долговечности деталей машин. Один из путей решения этой задачи – использование различных способов упрочнения и восстановления рабочих поверхностей деталей нанесением износостойких покрытий.

Эффективным и доступным методом нанесения износостойких покрытий является электромагнитная наплавка (ЭМН), позволяющая реализовать в едином технологическом процессе восстановление геометрических размеров и увеличение срока службы деталей за счет упрочнения – повышения износостойкости рабочей поверхности.

Сущность процесса заключается в следующем. Заготовка располагается на некотором расстоянии от полюсного наконечника сердечника электромагнитной катушки. Сердечник и катушка подключаются к источнику электрического тока. В зазор между обрабатываемой поверхностью заготовки и полюсным наконечником подается ферромагнитный порошок, частицы которого выстраиваются вдоль силовых линий магнитного поля и замыкают электрическую цепь “деталь-наконечник”. Зерна порошка под действием энергии проходящего по ним тока нагреваются, расплавляются и расплав порошка переносится на обрабатываемую поверхность вращающейся детали.