УДК 621.664:669.715

DOI: 10.31563/1684-7628-2018-47-3-62-68

А.В. Коломейченко, В.Н. Логачёв, А.А. Измалков

ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЭРОЗОЛЬНОГО ФЛЮСОВАНИЯ ПРИ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ

Ключевые слова: *электродуговая металлизация; аэрозольное флюсование; гидродиспергатор; химическая реакция; адгезия; пористость; покрытие.*

Введение. Электродуговая металлизация (ЭМ) имеет широкие возможности по сравнению с другими методами нанесения металлопокрытий [1–3]. С применением ЭМ

можно восстанавливать изношенные детали машин широкой номенклатуры в различных отраслях промышленности и сельского хозяйства, обеспечивать их высокую износостойкость, долговременную антикоррозионную защиту алюминием и цинком, получать покрытия из псевдосплавов, например, из алюминия и стали, меди и стали [4, 5]. Однако при неоспоримых достоинствах ЭМ этот процесс обладает и недостатками, такими, как выгорание легирующих элементов в процессе нанесения ЭМ-покрытия и высокое содержание окислов в нем. Для устранения этих недостатков и необходимо аэрозольное флюсование (АФ). Оно будет способствовать удалению из расплавленного металла растворенного в нем кислорода, а также легирования ЭМ-покрытия. АФ основано на том, что в факел диспергированного расплавленного электрической дугой металла вводится вместе со сжатым воздухом аэрозоль, представляющий собой раствор в дистиллированной воде химических материалов, которые при растворении в воде прошли этап электролитической диссоциации [6–9].

Цель исследований – подобрать оптимальные содержания компонентов флюса для получения более высоких физико-механических свойств ЭМ-покрытий.

Для достижения цели были поставлены следующие **задачи**: дать описание влияния активных элементов компонентов флюса на адгезионную прочность и пористость ЭМ-покрытий; исследовать влияние содержания компонентов флюса на адгезионную прочность и пористость ЭМ-покрытий.

Теоретическое обоснование. АФ при ЭМ является сложным химико-физическим процессом растворения неорганических веществ в воде и их диссоциации. Под действием высокой температуры электрической дуги происходит термическая диссоциация с выделением активных элементов с С, СО и последующий процесс карботермии, то есть раскисления железа, используемый в металлургии [10–12]. Далее показаны химические реакции карботермического процесса, происходящие при ЭМ с аэрозольным флюсованием с использованием углеродосодержащего соединения – кальцинированной соды Na_2CO_3 .

Диссоциация соды при ее растворении в воде:

Термическая диссоциация соды:

Далее при металллизации происходит термическая диссоциация углекислого газа CO_2 (формула 3) и раскисление железа (формула 4):

Практический интерес представляют собой алюминиевый, магниевый, кремниевый и графитовый порошки, а также их химические соединения. Активные элементы – алюминий, магний, кремний и др. – используются в процессе металлотермии для восстановления железа и других металлов из их окислов, галогенов и прочих соединений металлов, диспергируемых при ЭМ. Для раскисления железа может также использоваться криолит Na_3AlF_6 . При его растворении в воде происходит диссоциация:

Термическая диссоциация:

Металлотермия протекает с выделением теплоты и классифицируется по металлу-восстановителю: алюмотермический, силикотермический и другие процессы. Протекание алюмотермического процесса проходит по следующей химической реакции:

Для раскисления железа могут использоваться и другие соединения алюминия, растворимые в воде, или высокодисперсный алюминиевый порошок. Кроме представленных выше, также могут использоваться аэрозольные флюсы более сложного состава, например, с добавлением различных легирующих элементов (бор, азот, хром, никель и др.). В этом случае происходит образование упрочняющих структур за счёт получения твердых растворов (цементита, нитрида и карбидов) в результате термодиффузионных процессов.

Бор (В), как наиболее эффективный легирующий элемент, может быть получен при растворении в воде тетратбурата натрия $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ (формула 10) [13].

Диссоциация при растворении в воде:

Термическая диссоциация:

Использование в составе флюса алюминия или углерода для раскисления металла в покрытии и бора с азотом для его легирования, даст наибольшее значение адгезионной прочности. Наличие в составе флюса бора, а также углерода и азота позволит получить максимальную микротвердость. За счет связывания кислорода в зоне плавления металла компонентами флюса достигается повышение адгезии, снижается пористость покрытия. За счет образования твердых растворов и карбидов повышается микротвердость. Все это способствует увеличению ре-

сурса деталей, восстановленных методом ЭМ с АФ.

В связи с вышеизложенным для исследований был выбран состав флюса, содержащий кальцинированную соду Na_2CO_3 , криолит Na_3AlF_6 и тетрабулат натрия $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ [6, 14, 18]. Были проведены исследования микротвердости ЭМ-покрытий, полученных с использованием данного флюса с различным содержанием в нем указанных компонентов. В результате были определены флюсы, показавшие наилучшие результаты: № 1 (665 HV): $\text{CNa}_2\text{CO}_3 = 42$ г/л, $\text{CNa}_3\text{AlF}_6 = 6$ г/л, $\text{CNa}_2\text{B}_4\text{O}_7 = 12$ г/л и № 2 (771 HV): $\text{CNa}_2\text{CO}_3 = 42$ г/л, $\text{CNa}_3\text{AlF}_6 = 6$ г/л, $\text{CNa}_2\text{B}_4\text{O}_7 = 16$ г/л [6]. Дальнейшие исследования адгезии и пористости ЭМ-покрытий проводили с использованием этих двух флюсов.

Рисунок 1

Схема гидродиспергатора: 1 – корпус; 2 – воздушная магистраль; 3 – регулятор концентрации аэрозоля; 4 – воронка; 5 – кран регулировки подачи флюса, растворенного в воде; 6 – патрубок подачи аэрозоля в дугу металлатора; 7 – воздушная магистраль; 8, 9 – кран регулировки подачи воздуха; 10 – крепление; 11 – кран регулировки концентрации аэрозоля

Условия, материалы и методы исследования. Для проведения исследований ЭМ с АФ применяли сверхзвуковой электродуговой металлатор ЭДМ-9ШД, сварочный выпрямитель ВДУ-506 и гидродиспергатор (рисунок 1). В качестве материалов использовали сварочную проволоку Св-08Г2С ГОСТ 10543 и компоненты флюса: Na_2CO_3 , Na_3AlF_6 , $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, а также дистиллированную воду. Образцы для проведения исследований изготавливали из стали 45Г2. Перед нанесением ЭМ-покрытий на образцы проводили их струйно-корундовую обработку.

Гидродиспергатор работает следующим образом. Флюс, растворенный в воде, заливается через воронку 4 и поступает в корпус 1. Для регулировки подачи флюса имеется кран 5. В корпусе 1 установлены сопла, через которые подается сжатый воздух из воздушной магистрали 2 для интенсивного перемешивания водорастворимого флюса, превращая его в аэрозоль, который поступает в камеру-регулятор его концентрации 3. В эту же камеру подается воздух из воздушной магистрали 7, регулируемый краном 8. Далее через патрубок 6 аэрозоль движется в электрическую дугу металлатора.

Адгезионную прочность сформированных ЭМ-покрытий определяли штифтовым методом по ГОСТ 15140. Сущность данного метода заключается в определении величины разрушающего усилия при вытягивании штифта в направлении по нормали к его торцевой поверхности, на которую нанесено ЭМ-покрытие. Образец (рисунок 2) состоит из штифта и шайбы с захватным устройством в виде отверстия. Штифт в сборе с шайбой устанавливали в устройстве для закрепления образца и проводили струйно-корундовую обработку. ЭМ-покрытие наносили на рабочую поверхность образца при его равномерном перемещении (рисунок 3). Исследования по определению адгезионной прочности проводили на универсальной разрывной машине РМ-1000.

Рисунок 2

Образец для исследования адгезионной прочности ЭМ-покрытий:
а) схема; б) общий вид

Рисунок 3

Образец (в сборе) для определения адгезионной прочности ЭМ-покрытия

Пористость сформированных ЭМ-покрытий определяли методом цветной дефектоскопии по ГОСТ 9.302. После ЭМ и шлифования ($R_a = 0,63 \dots 0,64$ мкм) покрытия образцы (рисунок 4) охлаждали до комнатной температуры и обезжировали этиловым спиртом. Затем об-

разцы промывали дистиллированной водой и высушивали фильтровальной бумагой. Для окрашивания пор образцы помещали в раствор, содержащий калий железосинеродистый 3 г/л и натрий хлористый – 10 г/л и выдерживали 5 минут при температуре 18–30 °С [12, 13, 15–17].

Рисунок 4

Образец для исследования пористости ЭМ-покрытий: а) схема; б) общий вид

Промытые и высушенные образцы с участками синих пятен на поверхности исследовали под микроскопом, 20 $\times$. Пористость ЭМ-покрытий определяли как процентное отношение площадей окрашенных мест к площади рассматриваемого участка.

Результаты исследования. Адгезионная прочность. Известно, что одной из основных характеристик, определяющей эксплуатационные свойства различных покрытий, в значительной мере определяющей долговечность рабочих поверхностей деталей, является прочность сцепления между ЭМ-покрытием и основой (адгезионная прочность). Сравнительный анализ адгезионной прочности нанесенных ЭМ-покрытий в зависимости от используемых флюсов и содержащихся в них компонентов (рисунок 5) показал, что адгезия ЭМ-покрытий, нанесенных с применением АФ (60–66 МПа), в 2,1–2,2 раза выше аналогичных покрытий без АФ (30 МПа).

Повышение адгезионной прочности ЭМ-покрытий, полученных с применением АФ, объясняется раскисляющим действием углерода. Под действием высокой температуры электрической дуги происходит термическая диссоциация с выделением активных элементов с С, СО и последующий карботермический процесс, то есть происходит раскисление железа при расплавлении стальной проволоки в дуге металлизатора, в результате чего с подложкой контактирует более чистый диспергированный металл, что по-

вышает прочность его сцепления с материалом основы.

Рисунок 5

Значения адгезионной прочности ЭМ-покрытий:
1 – Св-08Г2С (без АФ); 2 – Св-08Г2С + АФ (флюс № 1);
3 – Св-08Г2С + АФ (флюс № 2)

Пористость занимает важное место в ЭМ-покрытиях. Она характеризует плотность и однородность нанесенного слоя металла. Изменение пористости ЭМ-покрытий показано на рисунке 6. Исследования показали, что использование при ЭМ аэрозольного флюсования позволяет снизить их пористость в 1,5–1,6 раза. Снижение пористости при использовании АФ объясняется тем, что вследствие раскисления железа уменьшается содержание его оксида, что способствует повышению плотности и качества наносимого слоя металла. Кроме этого, высокая скорость процесса способствует повышению кинетической энергии, что также обеспечивает получение более плотного и малопористого ЭМ-покрытия.

Рисунок 6

Пористость ЭМ-покрытий:

- 1 – Св-08Г2С (без АФ); 2 – Св-08Г2С + АФ (флюс № 1);
3 – Св-08Г2С + АФ (флюс № 2)

Вывод. Для улучшения физико-механических свойств ЭМ-покрытий целесообразно применять метод аэрозольного флюсования. Оптимальное содержание компонентов в составе флюса на основе дистиллированной воды следующее: $\text{CNa}_2\text{CO}_3 = 42$ г/л, $\text{CNa}_3\text{AlF}_6 = 6$ г/л, $\text{CNa}_2\text{B}_4\text{O}_7 = 16$ г/л. Наличие алюминия и углерода в аэрозоле необходимо для металлокарботермических процессов раскисления железа при нанесении ЭМ-покрытия, что обеспечивает повышение его адгезионной прочности в 2,1–2,2 раза и снижение пористости в 1,5–1,6 раза по сравнению с ЭМ-покрытиями, полученными без аэрозольного флюсования.

Библиографический список

1. Коломейченко, А.В. Улучшение физико-механических свойств покрытий полученных электродуговой металлизацией [Текст] / А.В. Коломейченко, И.Н. Кравченко, В.Н. Логачев, Н.Н. Литовченко, А.Ф. Пузряков // Строительные и дорожные машины. 2015. № 7. С. 25–29.
2. Матюшкин, Б.А. Регулируемое изменение процентного содержания элементов в рабочем слое при восстановлении деталей электродуговой металлизацией [Текст] / Б.А. Матюшкин, В.И. Денисов, А.А. Толкачев // Труды ГОСНИТИ. 2017. Т. 127. С. 166–170.
3. Воробьев, П.А. Метод аэрозольного флюсования при электродуговой металлизации [Текст] / П.А. Воробьев, М.Ю. Юсим, Н.Н. Литовченко, В.И. Денисов // Труды ГОСНИТИ. Том 101. Москва. 2008. С. 201–204.
4. Толкачев, А.А. Применение электродуговой металлизации для восстановления гильз цилиндров дизельных двигателей сельскохозяйственной техники [Текст] / А.А. Толкачев, В.И. Денисов, Б.А. Матюшкин // Труды ГОСНИТИ. 2017. Т. 126. С. 179–182.
5. Литовченко, И.Н. Восстановление деталей электродуговой металлизацией [Текст] / И.Н. Литовченко, В.И. Денисов, П.А. Воробьев, М.Ю. Юсим // Техника в сельском хозяйстве. 2008. № 2. С. 28–32.
6. Логачев, В.Н. Улучшение физико-механических свойств покрытий, полученных электродуговой металлизацией [Текст] / В.Н. Логачев // Техника и оборудование для села. 2017. № 3 (237). С. 28–31.
7. Logachev V.N., Kolomeichenko A.V., Kuznetsov Yu.A., Solovlev R.Yu., Denisov V.I., Sharifullin S.N. Aerosol fluxing in electro arc metallization. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering «International Scientific-Technical Conference on Innovative Engineering Technologies, Equipment and Materials 2016, ISTC-IETEM 2016». 2017. С. 012049.
8. Матюшкин, Б.А. Технологические особенности электродуговой металлизации в отрасли АПК [Текст] / Б.А. Матюшкин, В.И. Денисов, А.А. Толкачев // Технология машиностроения. 2016. № 10. С. 32–37.
9. Radyuk A.G., Gorbatyuk S.M., Gerasimova A.A. Use of electric-arc metallization to recondition the working surfaces of the narrow walls of thick-walls slab molds J. Metallurgist. 2011. Т. 55. № 5-6. Рр. 419–423.
10. Соловьев, Р.Ю. Металлокарботермические методы снижения окисления диспергированного металла при электродуговой металлизации [Текст] / Р.Ю. Соловьев, П.А. Воробьев, Н.Н. Литовченко // Сварочное производство. 2012. № 3. С. 43–47.
11. Лялякин, В.П. Физико-механические свойства покрытий, полученных электродуговой металлизацией порошковыми проволоками [Текст] / В.П. Лялякин, В.П. Мурзаев, Д.Б. Слинко, Р.Ю. Соловьев // Технология машиностроения. 2017. № 5. С. 24–28.
12. Мурзаев, В.П. Разработка ресурсосберегающих порошковых проволок для электродугового напыления [Текст] / В.П. Мурзаев, Д.Б. Слинко, Ю.Н. Щетинин // Труды ГОСНИТИ. 2013. Т. 113. С. 262–268.
13. Борисова, М.З. Анализ структуры износостойкого покрытия, полученного электродуговой металлизацией порошковой проволоки с тугоплавкими добавками [Текст] / М.З. Борисова, Н.Ф. Стручков, Г.Г. Винокуров // Наука и образование. 2016. № 2 (82). С. 76–80.
14. Борисов, Ю.С. Исследование влияния режимов электродугового напыления на структуру и свойства псевдосплавных покрытий [Текст] / Ю.С. Борисов, Н.В. Вигилянская, И.А. Демьянов, А.П. Грищенко, А.П. Мурашов // Автоматическая сварка. 2013. № 12 (727). С. 11–17.
15. Фархшатов, М.Н. Уменьшение потерь порошковых материалов при электроконтакт-

ной приварке [Текст] / М.Н. Фархшатов, И.Р. Гаскаров, Н.М. Юнусбаев // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2005. № 11. С. 32–33.

16. Сайфуллин, Р.Н. Способ электроконтактной приварки металлических порошков [Текст] / Р.Н. Сайфуллин, Э.Л. Левин, М.Н. Фархшатов, Н.М. Юнусбаев // Патент на изобретение RU 2322333 20.02.2006

17. Сайфуллин, Р.Н. Результаты исследования толщины покрытий, полученных электроко-

нтактной приваркой сетчатых присадочных материалов [Текст] / Р.Н. Сайфуллин, Н.М. Юнусбаев // В сборнике: Инновационно-промышленный салон. Ремонт. Восстановление. Реновация. Материалы III Всероссийской научно-практической конференции. 2012. С. 196–199.

18. Lyalyakin V.P., Murzaev V.P., Solovlev R.Y., Slinko D.B. Physico-mechanical properties of coatings produced by electric arc metallising with flux-cored wires. J. Welding International. 2017. T. 31. № 9. Pp. 729–732.

Сведения об авторах

1. **Коломейченко Александр Викторович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой надежности и ремонта машин, ФГБОУ ВО «Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина», 302019, Орел, ул. Генерала Родина, 69, e-mail: kolom_sasha@inbox.ru.

2. **Логачев Владимир Николаевич**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры надежности и ремонта машин, ФГБОУ ВО «Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина», 302019, Орел, ул. Генерала Родина, 69, e-mail: logvovan@mail.ru.

3. **Измалков Александр Андреевич**, аспирант кафедры надежности и ремонта машин, ФГБОУ ВО «Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина», 302019, Орел, ул. Генерала Родина, 69, e-mail: izmalckow.aleks2012@yandex.ru.

В работе представлены методики и результаты исследования адгезии и пористости покрытий, сформированных методом электродуговой металлизации (ЭМ) с применением аэрозольного флюсования (АФ) на стали 45Г2. АФ предназначено для раскисления и легирования металла при ЭМ и заключается в том, что в факел диспергированного расплавленного электрической дугой металла вводится вместе со сжатым воздухом аэрозоль, представляющий собой водный раствор химических неорганических материалов, которые при растворении в воде прошли этап электролитической диссоциации. В статье рассматриваются процесс АФ при ЭМ, а также необходимое оборудование и материалы, которые позволяют получать электрометаллизационные покрытия (ЭМ-покрытия) с высокими физико-механическими и эксплуатационными свойствами. Установлено, что для улучшения физико-механических свойств ЭМ-покрытий целесообразно использовать метод АФ, приме-

няя химические соединения, содержащие бор, азот, алюминий, углерод и другие легирующие компоненты, растворимые в воде. В статье приводятся химические реакции, происходящие при ЭМ с АФ. Показано, что наличие алюминия и углерода в аэрозоле, необходимых для металлокаботермических процессов раскисления железа, обеспечивает повышение адгезионной прочности и снижает пористость ЭМ-покрытий. Установлено, что адгезионная прочность ЭМ-покрытий за счет применения АФ при ЭМ увеличивается в 2,1–2,2 раза в сравнении с ЭМ-покрытиями, получаемыми без применения АФ. Пористость ЭМ-покрытий за счет применения АФ снижается в 1,5–1,6 раза в сравнении с покрытиями, полученными без АФ. ЭМ-покрытия с АФ можно использовать при ремонте изношенных деталей сельскохозяйственной техники различного назначения, а также для устранения брака на стадии их производства.

A. Kolomeichenko, V. Logachev, A. Izmailkov

REASONABILITY OF AEROSOL FLUXING USE AT THERMAL SPRAYING

Key words: *thermal spraying; aerosol fluxing; hydro-dispergator; chemical reaction; adhesion; porosity; coating.*

Authors' personal details

1. **Kolomeichenko Alexander**, Doctor of Technical Sciences, Professor, head of the Reliability and Repair of Machines department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Orel State Agrarian University named after N.V. Parakhin», 302019, Orel, St. General Rodina, 69, e-mail: kolom_sasha@inbox.ru.

2. **Logachev Vladimir**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, associate Professor of the Machine Reliability and Repair department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Orel State Agrarian University named after N.V. Parakhin», 302019, Orel, St. General Rodina, 69, e-mail: logvovan@mail.ru.

3. **Izmalckov Alexander**, Post-graduate Student of the Reliability and Repair of Machines department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Orel State Agrarian University named after N.V. Parakhin», 302019, Orel, St. General Rodina, 69, e-mail: izmalckow.aleks2012@yandex.ru.

The article presents the methods and the results of the investigation of adhesion and porosity of coatings being formed by thermal spraying (TS) with usage of aerosol fluxing (AF) on steel 45Г2. Aerosol fluxing (AF) is intended to deoxidation and metal alloying at thermal spraying (TS) and is that together with compressed air the aerosol is introduced into the torch of the metal dispersed and fused by the electric arc. The aerosol is the water solution of chemical inorganic materials, which on dissolving in water got over the stage of electrolytic dissociation. The process of aerosol fluxing (AF) at thermal spraying (TS) and the necessary equipment and materials, which allow obtaining electrometallized coatings (EM-coatings) with high physical and mechanical and performance properties, are examined. It is established, that to improve the physical and mechanical properties of electrometallized coatings (EM-coatings) is necessary to apply the aerosol fluxing (AF) method, using chemical compounds with boron, nitrogen, aluminum, carbon and other

alloying components dissolved in water. The article contains chemical reactions taking place at electrometallized coatings (EM) with aerosol fluxing (AF). It is proved that the presence of aluminum and carbon in aerosol, necessary for metallic carbothermal processes of ferrum deoxidation, provides the adhesion strength increase and reduces electrometallized coatings (EM) porosity. It is established that the adhesion strength at the expense of aerosol fluxing (AF) usage at electrometallized coatings (EM) increases in 2,1–2,2 times in comparison with electrometallized coatings (EM), obtained without aerosol fluxing (AF) application. Electrometallized coatings (EM) porosity at the expense of aerosol fluxing (AF) application decreases in 1,5–1,6 times in comparison with the coatings being obtained without aerosol fluxing (AF). Electrometallized coatings (EM) with aerosol fluxing (AF) can be used at repair of worn elements of agricultural machinery of different purpose and also for defect remedy at the manufacturing stage.

© Коломейченко А.В., Логачёв В.Н., Измалков А.А.