

Электродуговая металлизация: пути совершенствования оборудования и технологии

В.Н. Логачев, к.т.н., доцент ФГБОУ ВПО «Орловский государственный аграрный университет». 302019, г. Орел, ул. Генерала Родина, д. 69. Телефон: (4862) 43-19-79. E-mail: logvovan@mail.ru

Н.Н. Литовченко, к.т.н. ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский технологический институт ремонта и эксплуатации машинно-тракторного парка». 109428, г. Москва, 1-й Институтский пр., д.1. Телефон: (499)171-37-27 E-mail: gosniti@list.ru

Аннотация. Рассмотрены основные конструктивно-технологические факторы электродуговых металлаторов, существенно влияющих на качество их работы. Представлены результаты экспериментальных исследований на прочность сцепления, пористость, микротвердость и сравнительную износостойкость покрытий, получаемых при электродуговом напылении.

Ключевые слова: адгезионно-когезионная прочность, сверхзвуковое сопло металлатора, аэрозольное флюсование, окислительный потенциал.

В мировой практике восстановления деталей техники и антикоррозионной защиты алюминия и цинком труб, оборудования и металлоконструкций значительное распространение получила электродуговая металлизация (ЭМ), как один из самых технологичных, производительных, качественных и с универсальными возможностями методов металлопокрытий.

Однако наряду с явно положительными сторонами ЭМ имеет определенные недостатки. Это извечные ее проблемы – скорость и окисление диспергированного металла в гетерофазном потоке.

Без преодоления этих проблем ЭМ невозможно дальнейшее улучшение физико – механических свойств металлопокрытий.

Несмотря на обширный объем выполненных исследований по модернизации ЭМ за исторический период ее использования (более 100 лет) эти проблемы остаются до конца в совершенстве не решенными.

В ГНУ ГОСНИТИ за последние годы предприняты некоторые меры по дальнейшему совершенствованию ЭМ в направлении повышения скорости истечения металловоздушного потока, разработкой сверхзвукового воздушного сопла, а также улучшения качества ЭМ – покрытий методом аэрозольного флюсования. Рассмотрим подробнее эти исследовательские работы и их результаты.

В ГОСНИТИ разработаны две модели сверхзвуковых металлаторов – ЭДМ-11ШД (станочный) и ЭДМ-12ШД (ручной), которые по объективным показателям являют собой новое поколение ЭМ-техники.

Разработчики преследовали ту же цель, что и создатели ЭМ – оборудования фирмы TAFA, т.е. сверхзвуковое истечение металловоздушного потока и сужение угла факела распыла, добиваясь повышения физико-механических свойств покрытий без использования сложных устройств активации дуги, т.е. сжигания углеводородного топлива или горючих газов.

Работа была начата с газодинамического расчета истечения воздушной струи через профилированное сопло (рис.1).

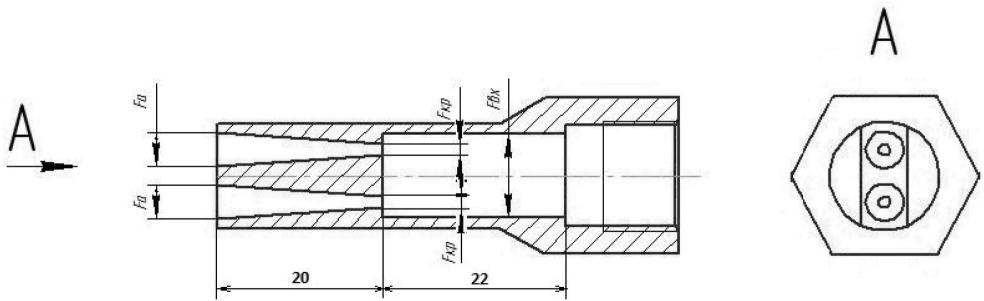


Рис. 1. Сверхзвуковое сопло металлатора ЭДМ-11ШД

1. Исходные данные для расчета:

P_O – полное давление в магистрали (кг/см^2);

F_{KP} – минимальное проходное сечение при истечении газа (см^2);

μ – коэффициент расхода сопла ($\mu \approx 0,85 \dots 0,9$);

T_O – температура воздуха ($T_O \approx 290 \text{ оК}$);

R – газовая постоянная (для воздуха $R=29,3$);

K – показатель адиабаты ($K=1,4$);

A – коэффициент истечения ($A \approx 0,023 \text{ 1/с}$);

$g = 9,8 \text{ м/с}^2$.

2. Расчет скорости звука или критической скорости газа при сверхзвуковом истечении из сопла:

$$C = \sqrt{K \cdot g \cdot R \cdot T_O} = \sqrt{1,4 \cdot 9,8 \cdot 29,3 \cdot 290} = 340 \text{ м/с.}$$

Это условие выполняется при соотношениях давлений в ресивере (магистрали) и окружающей среды $P_H: \frac{P_O}{P_H} \geq 1,89$. Если $\frac{P_O}{P_H} < 1,89$ – истечение дозвуковое и расчет проводится по другим зависимостям.

В обычно применяемых схемах (рис.1) должно обеспечиваться соотношение $\frac{F_{BX}}{F_{KP}} > 1,5 \dots 2$. При невыполнении этого условия возникающие потери приводят к снижению полного давления P_O на 20...30% из-за потери энергии при переходе сверхзвукового течения в дозвуковое.

Рассмотрим параметры сечения F_{BX} .

В штуцере оно составляет: $F_{BX} = 0,785 \cdot 7,5^2 = 44 \text{ мм}^2$.

Проходное сечение в сопле F_{KP} с учетом затенения электродной проволокой $\varnothing 2 \text{ мм}$:

$$F_{KP} = 0,785 \cdot 7^2 - 2 \cdot 7 = 24,5 \text{ мм}^2.$$

Имеем соотношение: $\frac{F_{BX}}{F_{KP}} = \frac{44}{24,5} = 1,8$, что удовлетворяет нормальным условиям работы сопловой системы.

Расход воздуха:

$$G = \mu \cdot A \cdot P_O \cdot F_{KP} = 0,85 \cdot 0,023 \cdot 7 \cdot 0,245 = 0,0335 \frac{\text{кг}}{\text{с}} \approx 33 \frac{\text{г}}{\text{с}}.$$

В связи с конструктивными особенностями сопла ЭДМ-11ШД (расположение в нем электродной проволоки) течение газа в сопле изменяется от звукового (при $F_{KP} = 24,5 \text{ мм}^2$) до сверхзвукового, так как в выходном сечении имеем $F_a = 0,785 \cdot 7^2 = 38,5 \text{ мм}^2$

С использованием таблиц газодинамических функций (А.А.Диментова и др.) [1] получаем: $q(\lambda) = q(\lambda) = \frac{F_{KP}}{F_a} = \frac{24,5}{38,5} = 0,63$, откуда $\lambda = 1,6$.

$$V_a = 340 \cdot 1,6 = 540 \text{ м/с (без учета теплоподвода за счет горения дуги)}$$

Данный расчет сверхзвуковой скорости воздушной струи из сопла выполнен без учета теплоподвода от электрической дуги. Сверхзвуковая скорость $V_a = 540$ м/сек – холодного воздуха.

Известно, что температура дуги около 6000°C [2]. Поэтому на основании газодинамического расчета можно предположить, что V_a увеличивается не меньше, чем в 3 раза.

В связи с разработкой сверхзвуковых металлаторов была поставлена задача оптимизации дистанции металлзации (H_d). Для этой цели проведены экспериментальные исследования функции зависимости адгезионно-когезионной прочности ЭМ – покрытий от дистанции металлзации при сверхзвуке и в дозвуковом режиме.

Оптимальным значением дистанции сверхзвуковой металлзации принят максимальный результат адгезионно-когезионной прочности ЭМ – покрытий.

При дозвуковой металлзации H_d принималась 120 мм, при сверхзвуковой H_c скорректирована до 160 мм.

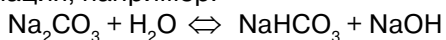
Увеличение максимальной скорости воздушного потока измеряемой разработанным в ГОСНИТИ прибором ПДГП-1 [3] металлзации способствует повышению качества металлзации при восстановлении коленчатых валов двигателей и других деталей, металлзировать которые возможно только при дистанции более 120 мм.

Сравнительные лабораторные испытания сверхзвукового металлатора ЭДМ-10ШД показали при дистанции металлзации 160 мм. повышение адгезионно-когезионной прочности на 25%, плотности покрытия на 23%, коэффициента использования присадочного материала на 15% по сравнению с дозвуковым уровнем истечения воздушной струи.

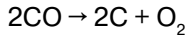
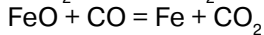
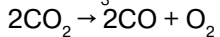
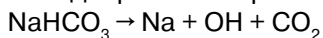
Для решения проблемы снижения окислительного потенциала при ЭДМ и легирования металла, расплавленного дугой в ГОСНИТИ разработан метод аэрозольного флюсования [4, 6, 7], сущность которого заключается в следующем.

Сущность аэрозольного флюсования (АФ) заключается в том, что в факел диспергированного металла при ЭМ, вводится аэрозоль, представляющую собой водный раствор различных веществ.

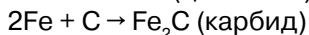
При растворении веществ в воде происходит их предварительная диссоциация, например:



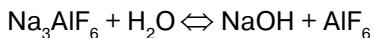
Попадая в зону высокой температуры электрической дуги и факела диспергированного металла предварительно диссоциированный карбонат натрия подвергается термической диссоциации.



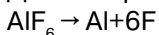
Далее, контактируя с расплавленным железом, образуются твердые фазы:



Таким образом, в процессе АФ происходит карботермический процесс и упрочнения. При АФ используются и другие составы веществ для получения аналогичного эффекта, например, при растворении алюмогидрида лития происходит его диссоциация:

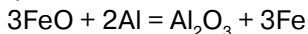


Далее термодиссоциация:



Металлотермия протекает с выделением теплоты по причине экзотермической реакции раскисления оксида железа алюминием с выделением около 200 ккал.тепла.

Как протекает алюмотермический процесс, понятно из следующей реакции:



При использовании алюмотермического эффекта, то есть реакции раскисления FeO алюминием, происходит увеличение температуры частиц металла в гетерофазном потоке по той же причине экзотермической реакции раскисления оксида железа с выделением тепла.

Известно [3], что температура в контакте частицы расплавленного металла при ее соударении с подложкой характеризует энергетическое состояние атомов (Т)

$$T = f(T_{\text{п}}, T_{\text{к}}, E_{\text{к}}, E_{\text{г}}),$$

где $T_{\text{п}}$ – температура подложки;

$T_{\text{к}}$ – температура капли металла;

$E_{\text{к}}$ – кинетическая энергия капли металла;

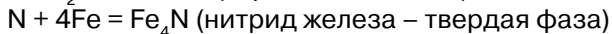
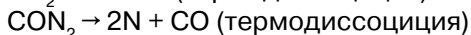
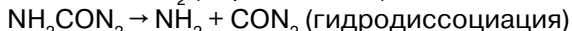
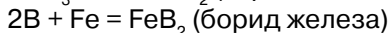
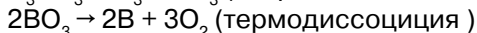
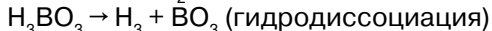
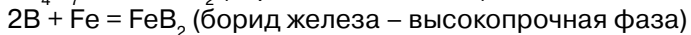
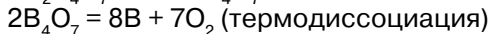
$E_{\text{г}}$ – кинетическая энергия гетерофазного потока.

Поэтому для получения эффекта увеличения прочности сцепления покрытия с подложкой, как и частиц в покрытии, необходимо увеличить Т и Е. Это подтверждается работами В.В.Кудинова по исследованию взаимодействия с подложкой отдельной частицы, из которых следует, что прочность сцепления в основном можно повышать путем увеличения температуры частицы металлов в контакте с подложкой и скорости V частиц [5].

Увеличение адгезионно-когезионной прочности ЭМ – покрытия за счет карботермического (С) металлотермического (Al) раскисления железа – это первая решаемая задача с помощью аэрозольного флюсования.

Второе назначение метода АФ – легирование металлируемого слоя с целью увеличения его прочности, твердости и износостойкости. Это достигается применением дополнительных веществ для приготовления аэрозоли, содержащих бор, азот, хром.

Процесс протекает аналогично приведенным выше реакциям. Для этого используются вещества, растворимые в воде, например бора ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$), борная кислота (H_3BO_3), карбамид (NH_2CON_2), нитрат хрома $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, карбонат ($\text{N}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) и др.



Для экспериментальных исследований по АФ использовался разработанный в ГОСНИТИ гидродиспергатор, представленный на рис. 2.

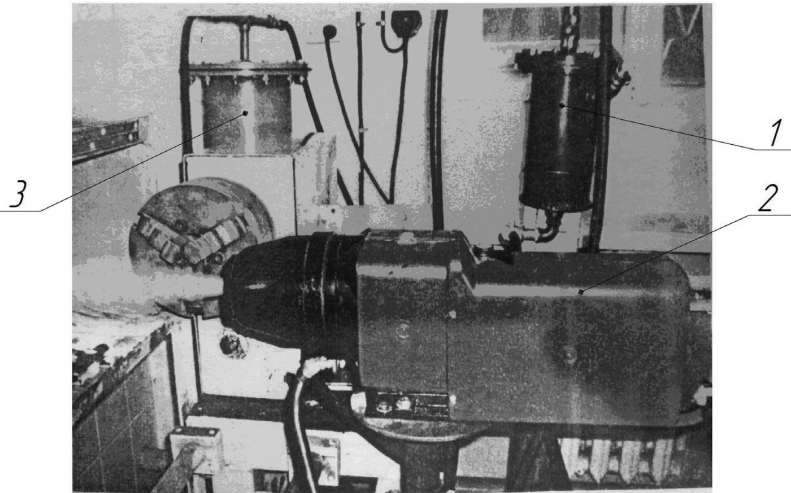


Рис. 2. Электродуговой металлатор в работе с гидродиспергатором для АФ: 1 – гидродиспергатор; 2 – металлатор; 3 – фильтр для очистки сжатого воздуха

Он представляет собой стальной цилиндр, в котором с помощью подаваемого в металлатор воздуха, диспергируется (измельчается) до тумановидного состояния водного раствора флюса. В этом виде, как показано на рисунке гетерофазный поток направляется в электрическую цепь дуги металлатор, где и происходит термодиссоциация растворенных веществ и другие фазовые превращения.

Результаты экспериментальных исследований

Обобщенные результаты экспериментальных исследований представлены в таблице.

В экспериментах использовались следующие присадочные материалы (проволока) при аэрозольном флюсовании и без него.

Св-08, флюс №1 – Na_2CO_3 , Na_3AlF_6 , $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$

Св-08, флюс №2 – Na_2CO_3 , Na_3AlF_6 , H_3BO_3

Св-08, флюс №4 – Na_2CO_3 , Na_3AlF_6 , $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$

Св-08, флюс №5 – Na_2CO_3 , Na_3AlF_6 , $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, NH_2CON_2

Св-08, флюс №6 – Na_2CO_3 , Na_3AlF_6 , $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, H_3BO_3

Св-08 (без флюса)

Св-08+X20H80 (без флюса)

Сталь 45 (без флюса)

Таблица – Результаты экспериментальных исследований

№ п/п	№ флюса	Концентрация, г/л	Расход раствора, мм/мин	Адгезия, когезия, кгс/мм ²	Пористость, %	Микротвёрдость, Нм	Сравнительная износостойкость, %*
1	1	60	10	5,4/5,2	3,8	560	100
2	2	50	5	5,4/5,3	3,6	540	50
3	4	60	10	5,5/5,3	4,1	560	100
4	5	60	10	4,4/2,5	4,5	560	110
5	6	60	5	5,0/4,8	5,2	580	90
6	Св-08			2,3/2,1	6,0	212	35
7	Св-08+X20H80			3,4/4,0	6,1	280	45
8	Сталь 45			3,0/2,8	6,2	510	100

*Износостойкость покрытия из Стали 45 без аэрозоли условно принята за 100%

Из таблицы видно, что наиболее высокие результаты по адгезионно-когезионной прочности, микротвердости и износостойкости получены при использовании флюсов №1, №4, №5, №6 при концентрации 60 г/л. На свойства покрытия значительное влияние оказывают не только состав флюса, но и концентрация вещества в аэрозоли и расход флюса.

Использование аэрозольного флюсования также положительно сказывается на поведении металлопокрытия в паре трения. На рисунках 3, 4 представлены диаграммы износа контртела (колотки) и коэффициент трения для различных металлопокрытий при их испытании на износостойкость на машине трения.

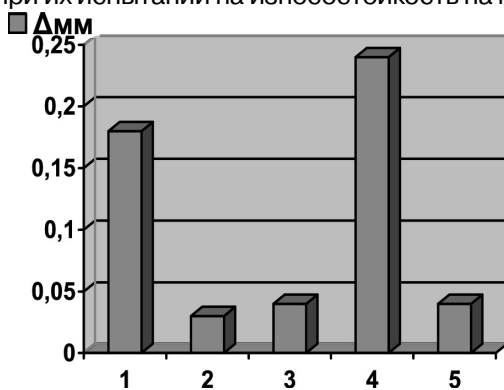


Рис. 3. Износ колотки для различных металлизационных покрытий: 1 – Св-08 (без аэрозоли); 2 – Св-08 + аэрозоль №5; 3 – Св-08 + аэрозоль №4; 4 – Св-08 + X20H80 (без аэрозоли); 5 – Сталь 45 (без аэрозоли)

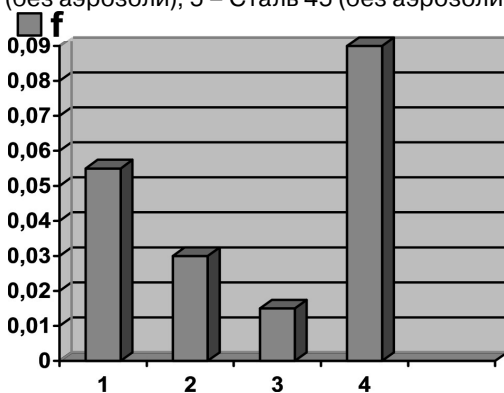


Рис. 4. Коэффициент трения для различных металлизационных покрытий: 1 – Св-08 (без аэрозоли); 2 – Св-08 + аэрозоль №4; 3 – Св-08 + аэрозоль №6; 4 – Св-08 + X20H80 (без аэрозоли)

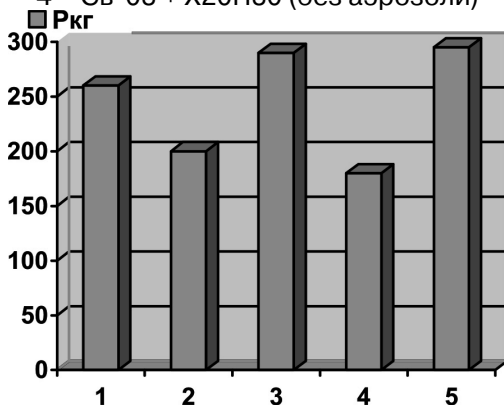


Рис. 5. Диаграмма нагрузки задира для различных металлизационных покрытий при сравнительных испытаниях

Выводы

В соответствии с газодинамическим расчетом разработанного сопла электродугового металлизатора сверхзвуковая скорость истечения воздушного потока составила 540 м/с без учета температуры горения дуги.

Экспериментально с помощью разработанного в ГОСНИТИ прибора ПДГП – 1 определена максимальная скорость воздушного потока на дистанции 160 мм от точки пересечения электродных проволок. На основании этого скорректирована принятая ранее дистанция металлзации со 120 до 160 мм, что расширило возможности применения ЭМ.

Улучшение физико-механических свойств ЭМ – покрытий достигается за счет раскисления железа алюминием и углеродом (металлокарбонтермией) и его легирования бором, азотом, углеродом при аэрозольном флюсовании.

Использование аэрозольного флюсования при ЭМ обеспечивает увеличение адгезионно – когезионной прочности на 25...30%, повышение микротвердости до 40%, снижение пористости на 20...25%.

Список литературы

Дименьтева А.А., Рекстин Ф.С., Рябов В.А. Таблицы газодинамических функций. «Машиностроение», Ленинград, 1966 г.

Э. Кречмар. Напыление металлов, керамики и пластмасс. «Машиностроение», 1966 г.

Соловьев Р.Ю., Литовченко Н.Н., Петряков Б.И. Прибор для измерения давления гетерофазного потока. Патент №2385452, 2010 г.

Литовченко Н.Н., Шевченко В.П. Авторское свидетельство №1183562, 1985 г.

Кузенков В.В. и другие. Влияние перегрева напыляемых частиц и окисных пленок на поверхности металлических подложек на тепловые процессы между частицей и подложкой при напылении. «Физика и химия обработки материалов» №6, 1979 г.

Пути совершенствования оборудования и технологии электродуговой металлзации / Литовченко Н.Н., Логачев В.Н. // Тракторы и сельхозмашины. – 2013. – №11. – С52-54.

Метод аэрозольного флюсования при электродуговой металлзации / Воробьев П.А., Юсим М.Ю., Литовченко Н.Н., Денисов В.И. // Труды ГОСНИТИ. – Том 101. Москва – 2008. – С 201-204.

Ways to improve the equipment and technologies arc spraying

Logatchev V.N. Ph.D., associate professor of FGBOU VPO «Orel State Agrarian University». 302019, Orel, ul. General Homeland, 69. Phone: (4862) 43-19-79.

E-mail: logvovan@mail.ru

Litovchenko N.N. Ph.D., Head of the Laboratory number 10 of the FGBNU «all-Russian research Institute of technology of repair and maintenance of machine-tractor Park». 109428, Moscow, 1st Institutsky Ave, 1. Phone: (499) 171-

37-27 E-mail: gosniti@list.ru

Annotation. *The basic structural and technological factors electric Metal-lizator that significantly affect the quality of their work. Presents the results of experimental researches on the strength of adhesion, porosity, microhardness and comparative wear resistance of the coatings obtained by electric-arc spraying.*

Keywords: *adhesive-cohesive strength, supersonic nozzle metallizer, aerosol fluxing, the oxidation potential.*