

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ И ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ НА ДВУХФАЗНЫЙ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ПОТОК

А. Н. ДУБОВОЙ, А. А. КАРПЕЧЕНКО, М. Н. БОБРОВ

Нац. ун-т кораблестроения им. Адмирала Макарова. 54025, г. Николаев, просп. Героев Сталинграда, 9.
E-mail: welding@nuos.edu.ua

Известны публикации по повышению физико-механических свойств покрытий путем модуляции плазменной дуги, использованию дополнительных источников напряженности электрического поля. В работе изучено влияние электро- и импульсного воздействия на двухфазный высокотемпературный поток (ДВТП) и, как следствие, на структуру и эксплуатационные свойства электродуговых и плазменных покрытий. Исследована взаимосвязь амплитудно-частотных характеристик высоковольтных электрических импульсов с микроструктурой и свойствами полученных покрытий. Показано, что под влиянием электроимпульсного воздействия уменьшается размер капель металла в ДВТП и достигается более плотная структура плазменного порошка марки ПГ-19М-01 и электродугового покрытия из проволоки Св-08Г2С. Повышается прочность сцепления на 18...30 %, твердость на 20...35 %, а износостойкость возрастает в 1,7 раза. Библиогр. 8, табл. 3, рис. 5.

Ключевые слова: газотермические покрытия, электрический импульс, твердость, износостойкость, прочность сцепления

Разработка технологий упрочнения и восстановления деталей машин и их узлов остается актуальной проблемой, которая на современном этапе развития науки и техники преимущественно решается нанесением функциональных покрытий методами газотермического напыления (ГТН). Среди методов ГТН в последнее время все большее внимание уделяется плазменному и электродуговому. Плазменный метод характеризуется возможностью нанесения покрытий из тугоплавких материалов, а также универсальностью. Интерес к электродуговому напылению объясняется высокой производительностью метода, технологичностью и низкой стоимостью. Но наряду с этим есть присущие обоим методам недостатки: высокий уровень пористости (от 6 до 12 %), низкая адгезионная прочность (до 30 МПа для электродуговых покрытий и до 50 МПа для плазменных). Для повышения физико-механических свойств газотермических покрытий используют дополнительные технологические операции: оплавление, электро-механическую обработку, пропитку и т. п., что приводит к значительному повышению стоимости покрытий за счет увеличения энергозатрат, применения дополнительных материалов и создания новых устройств.

Известно, что повышение физико-механических свойств плазменных покрытий можно обеспечить наложением на постоянный ток плазмен-

ной дуги коротких импульсов. Так, в работах [1, 2] показано, что при модуляции дуги плазмотрон становится источником ударных волн, которые взаимодействуют с напыляемыми частицами на дистанции напыления. Данное взаимодействие приводит к измельчению и ускорению частиц, что обеспечивает повышение физико-механических свойств полученных покрытий. Известны работы [3, 4], посвященные плазменному напылению с использованием дополнительного источника напряженности электрического поля. Согласно проведенным исследованиям сделаны выводы о положительном влиянии данного воздействия на скорость частиц и прочность сцепления покрытий.

Цель настоящей работы заключалась в изучении влияния электроимпульсного воздействия на двухфазный высокотемпературный поток (ДВТП) и, как следствие, на структуру и эксплуатационные свойства электродуговых и плазменных покрытий.

Объектом исследований выбраны электродуговые покрытия из проволоки марки Св-08Г2С и плазменные покрытия из порошка марки ПГ-19М-01. Электродуговые покрытия наносили на установке КДМ-2 распылителем ЭМ-14М на следующем режиме: напряжение на дуге 25 В, сила тока 110 А, давление сжатого воздуха 0,6 МПа, дистанция напыления 100 мм. Плазменные покрытия наносили на установке «Киев-7», которая

Таблица 1. Интервал варьирования и уровни факторов при планировании эксперимента для электродугового и плазменного напыления с электроимпульсным воздействием

Наименование фактора	Частота, кГц	Напряжение, кВ
Кодированное обозначение	X_1	X_2
Нулевой уровень X_{i0}	6	7,5
Интервал варьирования ΔX	2	2,5
Нижний уровень X_i	4	5
Верхний уровень X_i	8	10

укомплектована плазмотроном ПУН-1 на следующем режиме: напряжение на дуге 180 В, сила тока 150 А, дистанция напыления 180 мм, расход плазмообразующего газа 6,5 м³/ч; давление транспортирующего газа 0,01 МПа. В качестве плазмообразующего и транспортирующего газов использовали сжатый воздух. Твердость покрытий измеряли на приборе типа Виккерс при нагрузке на индентор 5 кг. Металлографические исследования проводили на оптическом микроскопе ММУ-3. Износостойкость покрытий определяли на машине трения СМЦ-2, прочность сцепления покрытий с основой — на разрывной машине УММ-5.

Для электроимпульсного воздействия на ДВТП использовали источник высоковольтных электрических импульсов, который подключали к распылителям по прямой схеме. Предварительные эксперименты показали, что использование частот до 4 кГц и напряжений до 5 кВ существенно не влияет на прочностные свойства покрытий и пористость, поэтому для планирования эксперимента выбраны соответствующие диапазоны частот и напряжений электрических импульсов (табл. 1).

Таблица 2. План и результаты опытов для электродуговых покрытий из проволоки Св-08Г2С

Кодированное значение факторов				Функция отклика, МПа					Y_p , МПа	Среднеквадратическое отклонение, МПа
X_0	X_1	X_2	X_{12}	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5		
+	+	-	-	2510	2570	2570	2490	2570	2542	34,9
+	-	-	+	2060	2060	2100	2080	2060	2072	16
+	+	+	+	2570	2570	2490	2440	2440	2502	58,4
+	-	+	-	2360	2290	2250	2320	2230	2290	46,9

Таблица 3. План и результаты опытов для плазменных покрытий из порошка марки ПГ-19М-01

Кодированное значение факторов				Функция отклика, МПа					Y_p , МПа	Среднеквадратическое отклонение, МПа
X_0	X_1	X_2	X_{12}	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5		
+	-	-	+	1330	1372	1390	1400	1330	1364	29,5
+	-	+	-	1470	1430	1450	1450	1415	1443	18,9
+	+	-	-	1230	1270	1270	1320	1270	1272	28,6
+	+	+	+	1290	1280	1320	1294	1254	1288	21,4

Для определения оптимальных параметров электроимпульсного воздействия на ДВТП применяли метод полного факторного эксперимента типа 2^k. Параметром оптимизации являлась твердость покрытий. В качестве варьируемых факторов были выбраны частота и напряжение. Такие факторы как сила тока, напряжение, дистанция напыления и т. д. зафиксировали на выше указанных режимах. На каждом режиме напыляли по пять образцов, после чего их шлифовали до толщины покрытия в 1 мм и измеряли их твердость HV5.

План полного факторного эксперимента и его результаты представлены в табл. 2 и 3.

На основании статистически обработанных экспериментальных данных рассчитывали коэффициенты регрессий, проводили проверку их значимости и проверку адекватности полученных моделей реальному процессу напыления электродуговых и плазменных покрытий по известным методикам [5], в результате чего были получены следующие уравнения регрессии:

для электродугового напыления: $Y = 2352 + 171X_1 + 45X_2 - 65X_1X_2$;

для плазменного напыления: $Y = 1342 - 62X_1 + 24X_2 - 16X_1X_2$.

По построенным моделям провели оптимизацию параметров электроимпульсного воздействия на ДВТП по методу крутого восхождения. При электродуговом напылении максимальное значение твердости получили при частоте 6,5 кГц, при плазменном — 5 кГц. Значение напряжения составило 5 кВ. Анализ микроструктур (рис. 1) свидетельствует о том, что использование электроимпульсного воздействия на ДВТП приводит к измельчению структурных элементов покрытия, а также к снижению пористости с 6 до 3 % для электродуговых покрытий и с 6 до 2 % для плаз-

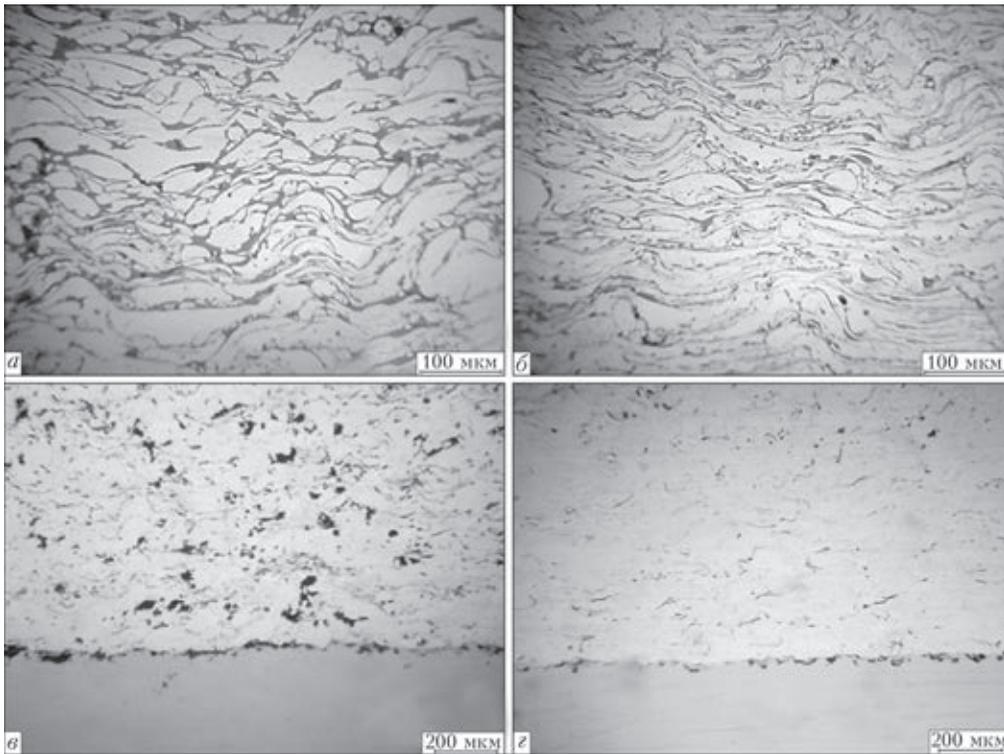


Рис. 1. Микроструктуры покрытий: *a* — электродуговое покрытие, полученное по традиционной технологии; *b* — электродуговое покрытие, нанесенное с применением электроимпульсного воздействия (частота 6,5 кГц, напряжение 5 кВ); *c* — плазменное покрытие, полученное по традиционной технологии; *d* — плазменное покрытие, нанесенное с применением электроимпульсного воздействия (частота 5 кГц, напряжение 5 кВ).

менных покрытий, при этом твердость покрытий повысилась на 35 и 20 % соответственно.

Фракционный состав напыляемых частиц определяли металлографическим методом по пробам, собранным при напылении в воду. Снимки микроструктур получали цифровой камерой Delta Optical HDCE-20C, укомплектованной программным обеспечением Score Image 9.0. Полученные снимки анализировали в программном металлографическом комплексе MEGHAN. Всего проанализировано по пять проб, в каждую из которых входило около 1000 частиц. Результаты исследований, приведенные на рис. 2, показали, что при использовании электроимпульсного воздействия на оптимальном режиме наблюдается дополнительное дробление частиц в двухфазном потоке.

Как при плазменном, так и при электродуговом напылении капли расплавленного металла диспергируются под действием аэродинамического влияния струи газа. При этом диспергирование жидкой капли происходит только при достижении критического значения диаметра капли, при меньшем размере распад капли невозможен. При использовании дополнительного накладывания электрических импульсов на ДВТП возможно дальнейшее дробление жидкой капли двумя путями. Первый объясняется возникновением несамостоятельного газового разряда при приложении импульсной разницы потенциалов на дистанции напыления. Газовый разряд сопрово-

ждается возникновением ударных волн, которые дополнительно диспергируют жидкие капли в высокотемпературном потоке. Второй связан с приобретением дополнительного заряда жидкими частицами, что приводит к снижению их поверхностного натяжения и ее распаду за счет возникновения кулоновских сил отталкивания в переменном электрическом поле [6–8]. Воздействие ударных волн обеспечивает повышение скорости частиц, а связанное с дроблением уменьшение отклонения от среднего диаметра приводит к уменьшению разброса по скоростям. Все это обеспечивает более плотную и равномерную упаковку

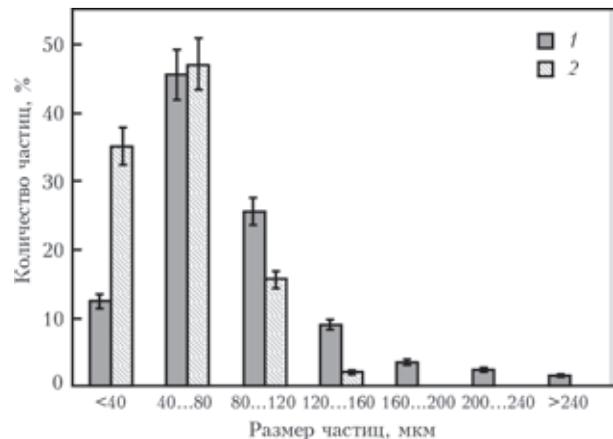


Рис. 2. Фракционный состав частиц при электродуговом напылении: 1 — напыление проводили по традиционной технологии; 2 — с использованием электроимпульсного воздействия на оптимальном режиме

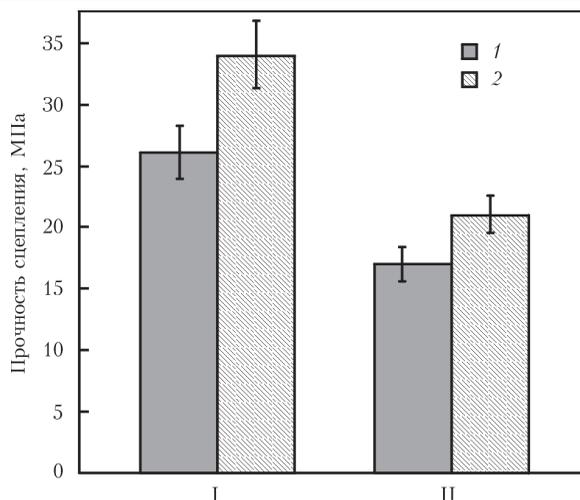


Рис. 3. Результаты определения прочности сцепления электродуговых (I) и плазменных (II) покрытий; 1 — напыление проводили по традиционной технологии; 2 — с использованием электроимпульсного воздействия на оптимальном режиме

частиц в покрытии, прочность его увеличивается, пористость снижается.

Для определения эксплуатационных свойств покрытий проведены испытания на прочность сцепления покрытий с основой и износостойкость.

Прочность сцепления покрытий с основой определяли методом «вытягивания конусного штифта». Образцы для определения прочности сцепления изготавливали из углеродистой конструкционной качественной стали 45. Перед нанесением покрытий поверхность обезжиривали техническим этанолом и подвергали струйно-абразивной обработке. Толщина нанесенных покрытий составляла 0,6 мм. Напыление проводили на выше указанных режимах. Для получения результатов прочности сцепления покрытий с основой напыление на одном режиме осуществлялось в один проход на пять образцов. Для каждого режима проводилось по пять параллельных

опытов. На рис. 3 представлены результаты определения прочности сцепления покрытий с основой.

Таким образом, при наложении высоковольтных электрических импульсов амплитудой 5 кВ, частотой 6,5 кГц на ДВТП наблюдается повышение прочности сцепления электродугового стального покрытия на 30 %, а бронзового плазменного покрытия на 20 %. Повышение адгезии полученных покрытий можно объяснить увеличением их скорости как за счет дробления, так и воздействия ударных волн, что обеспечивает большую фактическую площадь контакта частиц с основой.

Износостойкость электродуговых покрытий определяли по схеме ролик — колодка (рис. 4, а) при ограниченной подаче смазки со скоростью 30 капель в минуту. В качестве смазки использовали моторное масло марки М10Г2К ГОСТ 8581–75. Окружная скорость вращения ролика составляла 0,8 м/с, давление 4 МПа. Замеры потерь массы проводили после приработки на весах ТВЕ-0.21 через каждые 10 км пути. Всего было снято по 10 замеров.

Колодку и ролик изготавливали также из стали 45. Электродуговое покрытие после обезжиривания и струйно-абразивной обработки наносили на ролик. Колодку подвергали термическому улучшению: закалку осуществляли с температуры 840 °С и выдержке в течение 50 мин, охлаждение в воде. После закалки твердость составила HRC 54...55. Затем проводили отпуск при температуре 550 °С с выдержкой в течение 1 ч и охлаждением на воздухе. Твердость после отпуска составила HRC 30...32.

Анализ результатов определения износостойкости (рис. 4, б) показал, что электродуговое покрытие, нанесенное с использованием высоковольтных электрических импульсов, имеет в 1,7 раза меньший износ, чем покрытие, напыленное по традиционной технологии.

Анализ поверхности трения (рис. 5) покрытий показал, что при заданных условиях для исследуемых образцов характерно механохимическое изнашивание, сопровождающееся образованием на поверхности сопряженной пары пленок, обогащенных кислородом.

Поверхность трения ролика, напыленного с наложением электрических импульсов (рис. 5, б) является более плотной и имеет пористость в 2 раза меньше, чем покрытие, напыленное по традиционной технологии (рис. 5, а). На рис. 5, б видны следы трения небольшой глубины, которые более равномерно расположены по трущейся поверхности, что приводит к меньшему износу.

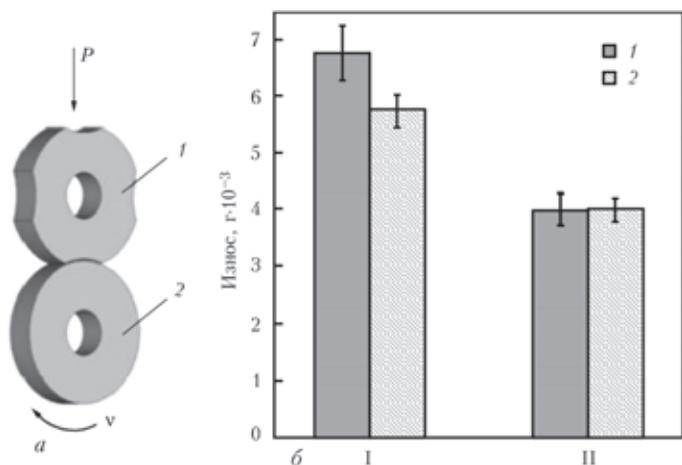


Рис. 4. Износостойкость электродуговых покрытий: а — схема испытаний на износостойкость (1 — колодка; 2 — ролик); б — результаты испытаний на износостойкость: I — без наложения электрических импульсов; II — с наложением высоковольтных электрических импульсов частотой 6,5 кГц, напряжением 5 кВ (1 — покрытие; 2 — колодка)

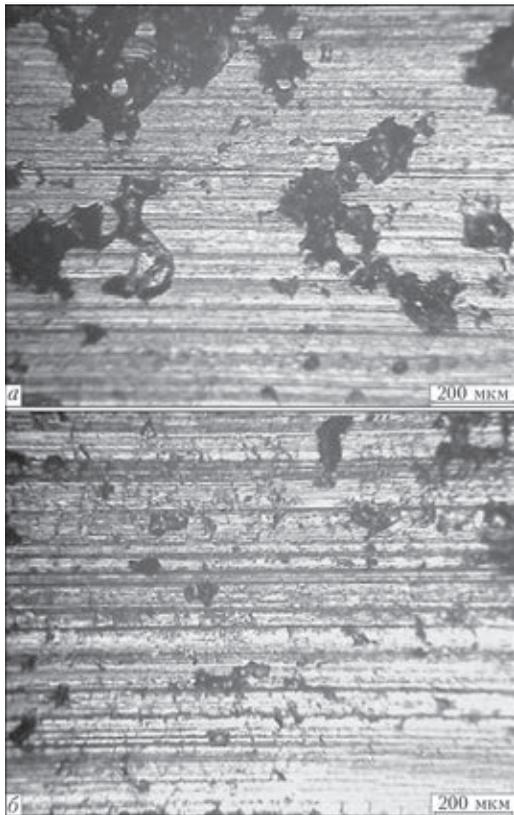


Рис. 5. Микроструктуры поверхности трения напыленного ролика: а — напыление по традиционной технологии; б — с использованием электроимпульсного воздействия на оптимальном режиме

Следует отметить, что стоимость источника генерирования высоковольтных электрических импульсов составляет около 5 % стоимости, например, оборудования для электродугового напыления. При этом эффект от его применения может обеспечивать получение покрытий с повышенными в среднем на 30 % эксплуатационными свойствами.

Выводы

Использование электроимпульсного воздействия на ДВТП при электродуговом и плазменном напылении покрытий позволяет уменьшить размер капель металла в двухфазном потоке и получить более плотную структуру плазменного покрытия из порошка марки ПГ-19М-01 и электродугового покрытия из проволоки Св-08Г2С. Установлены оптимальные параметры электроимпульсного воздействия при плазменном и электродуговом напылении покрытий из упомянутых материалов, которые обеспечивают повышение прочности сцепления на 18...30 %, твердости на 20...35 % соответственно, износостойкости электродугового покрытия в 1,7 раза.

1. Гутман Б. Е. Измельчение капель при плазменном напылении с модуляцией тока // Автомат. сварка. – 1988. – № 9. – С. 37–39.
2. Кадырметов А. М. Исследование процессов плазменного нанесения и упрочнения покрытий и пути управления их качеством // Научный журнал КубГАУ. – 2012 – № 81. – С. 1–18.
3. Коротких В. М. Управляемые энергоэффективные технологии плазменного напыления защитных покрытий сельскохозяйственного назначения // Вестник Алтайского гос. аграрного ун-та. – 2011. – № 8(82). – С. 83–87.
4. Пат. 2335347, Россия, МПК В05В7/22. Установка плазменного напыления / Н. В. Гальшкин, В. М. Коротких; Заявитель и патентообладатель Гос. образовательное учреждение высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова» (АлтГТУ). – Заявл. 09.01.2007.
5. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. – 279 с.
6. Григорьев А. И. Электродиспергирование жидкости при реализации колебательной неустойчивости ее свободной поверхности // Ж. техн. физики. – 2000. – Т. 70. – Вып. 5. – С. 22–27.
7. Григорьев А. И. Капиллярные электростатические неустойчивости // Соровский образовательный журнал. – 2000. – Т. 6. – Вып. 6. – С. 37–43.
8. Григорьев А. И. Электростатическая неустойчивость сильно заряженной струи электропроводной жидкости // Ж. техн. физики. – 2009. – Т. 79. – Вып. 4. – С. 36–45.

Поступила в редакцию 20.06.2014

Международная научно-техническая конференция «СВАРКА И РОДСТВЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ И ОСОБЫХ УСЛОВИЯХ»

11–12 ноября 2014

Россия
г. Санкт-Петербург
ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей»

Тематика

- Сварка, родственные процессы и технологии в экстремальных и особых условиях
- Оборудование для реализации технологий
- Материалы для сварки
- Работоспособность сварных соединений и конструкций
- Металлургические и физические процессы
- Методы и средства контроля
- Аттестация, сертификация, технический надзор
- Методологические и технико-экономические аспекты

Контакты: тел. +7921 935-30-91, 947-82-74, 952-81-47