

УДК 621.791:658.58

СПОСОБ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ ПУЛЬСИРУЮЩЕЙ МОЩНОСТИ НА ПРОЧНОСТЬ СЦЕПЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

¹Кравченко И.Н., ²Пузряков А.Ф., ¹Гладков В.Ю., ¹Москаль О.Я.¹ФГБВО ВПО «Военно-технический университет», Балашиха;²Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
Москва, e-mail: kravchenko-in71@yandex.ru

Одним из перспективных способов получения защитных и износостойких покрытий повышенной прочности являются плазменные методы их нанесения. Плазменные покрытия характеризуются сравнительно невысокой прочностью сцепления. Это сдерживает широкое применение плазменных покрытий для деталей, работающих в условиях высоких контактных нагрузок. Существенно увеличить прочность напыленных покрытий возможно путем введения в состав дисперсного покрытия фазы, обладающей большей пластичностью и размером, превышающим величину частиц в покрытии. В статье на основе разработанной модели образования упрочненного двухфазного покрытия предложен новый способ плазменного напыления с использованием электрической дуги пульсирующей мощности.

Ключевые слова: композиционные материалы, плазменное напыление, прочностные свойства дисперсных покрытий, локальное оплавление, электрическая дуга пульсирующей мощности (ЭДПМ)

THE MODE OF ACTION OF AN ELECTRIC ARC PULSED POWER ON THE STRENGTH OF ADHESION OF COATINGS

¹Kravchenko I.N., ²Puzryakov A.F., ¹Gladkov V.Y., ¹Moskal O.J.¹FSEI HME «Military-Technical University», Balashikha;²Moscow State Technical University named after N.E Bauman, e-mail: kravchenko-in71@yandex.ru

One of the promising methods of protective and wear-resistant coatings are rugged plasma methods of application. Plasma coatings are characterized by a relatively low bond strength. This restricts widespread use of plasma coatings for components operating at high contact loads. Substantially increase the strength of the coatings is possible by the introduction of the dispersed phase coating having greater plasticity and a size greater than the value of the particles in the coating. On the basis of the model of two-phase formation of the hardened coating a new method of plasma spraying using a pulsed arc power.

Keywords: composite materials, plasma spraying, coating strength properties of dispersed, local melting, electric arc pulsed power (EDPM)

Создание фазы, обладающей большей пластичностью и размером, превышающим величину частиц в покрытии, возможно оплавлением некоторого объема частиц в составе покрытия. При этом дисперсные напыленные покрытия достаточно оплавлять различными энергетическими источниками: электрической дугой, газовым пламенем, лазерным излучением и др. Для обеспечения гибридной технологии – плазменное напыление и локальное оплавление, – целесообразно использовать единый комплекс технологического оборудования. Использование источников питания электрической дуги в плазмотронах; электрическая проводимость плазменной струи, генерируемой плазмотроном; высокая концентрация энергии в пятнах привязки электрической дуги предопределяют преимущественное применение в гибридной технологии электрической дуги для оплавления локальных участков дисперсного покрытия. Так как эти участки обладают большей прочностью, чем окружающая их область покрытия, оплавленные зоны могут воспринимать соответственно и большую нагрузку. Также, имея объем во много раз

большой, чем частица в составе покрытия ($2 \times 10^{-5} - 10^{-4}$ м), эти зоны являются сдерживающим фактором на фронте распространения трещины. Таким образом, появлением упорядочено расположенных зон оплавленного материала в объеме всего дисперсного напыленного покрытия существенно повышается его прочность и увеличивается несущая способность напыленной детали.

Периодическое воздействие электрической дуги на дисперсное напыленное покрытие создает локальные оплавленные участки, расположенные соответственно частоте воздействия тока дуги при перемещении плазмотрона относительно поверхности детали. Размеры зон оплавления, глубина проплавления и температура перегрева подчиняются определенным зависимостям, связывающим электрические параметры импульса тока дуги и теплофизические характеристики материала покрытия [1, 2, 3].

Схема процесса плазменного напыления показана на рисунке 1, а. Между электродами 2 и 4 плазмотрона в потоке плазмообразующего газа возбуждается электрическая дуга 5, являющаяся нагрузкой источника

питания 1 (ИП-1). Нагреваясь, газ образует плазменную струю и, выходя из сопла плазмотрона, переносит на поверхность детали напыляемый материал 3, который вводится в поток газа. Частично оплавленные или расплавленные частички материала покрытия осаждаются на поверхности детали 7, образуя характерную для напыленных покрытий слоистую структуру 6.

Приблизив плазмотрон к поверхности детали на расстояние h_2 до касания проводящей зоны 8 плазменной струи и, подключив к плазмотрону и к детали дополнительный источник питания 9 (ИП-2), замыкается электрическая цепь «катод плазмотрона – анод плазмотрона – деталь». Схематическое изображение этого процесса показано на рис. 1, б. Периодическое возбуждение электрической дуги от источника ИП-2 позволяет получить на поверхности опорные пятна электрической дуги, горящей в потоке плазмы. Эти опорные пятна дуги – катодные или анодные, в зависимости от полярности подключения к детали источника ИП-2, – расплавляют ограниченные участки 10 покрытия, наносимого на поверхность детали.

При этом шаг расплавленных участков S зависит от частоты импульсов тока ИП-2 и от относительной скорости V перемещения плазмотрона и детали, а величина R этих участков – от силы тока дуги и от длительности импульсов тока.

При дальнейшем приближении плазмотрона на расстояние h_3 к поверхности детали (см. рис. 1, в) тепловой поток от струи и от импульсов тока ИП-2 образует непрерывную расплавленную ванну 11 материала покрытия и процесс напыления переходит в процесс плазменной наплавки покрытия с перегревом поверхности детали и с образованием общей для двух последующих импульсов тока, сварочной ванны.

Таким образом, процесс нанесения покрытий (см. рис. 1, б) характеризуется меньшим вводом тепла и большей прочностью покрытия за счет локального приваривания участков покрытия к поверхности детали, чем при классическом способе плазменного напыления. С другой стороны, отсутствует общая сварочная ванна и на поверхность детали воздействует меньший тепловой поток, чем в процессе плазменной наплавки.

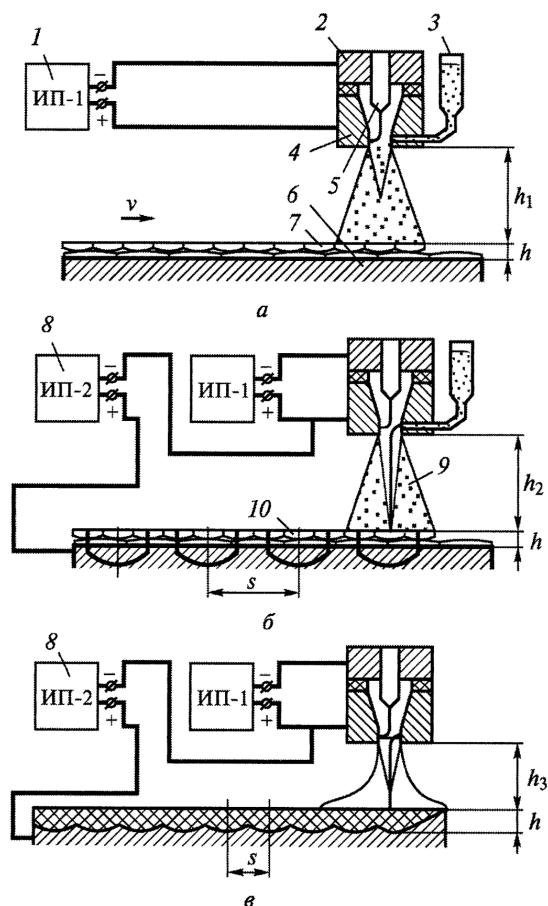


Рис. 1. Физическая модель процесса плазменного напыления с воздействием на подложку электрической дуги пульсирующей мощности

Рассматриваемый процесс занимает промежуточное положение между процессами напыления и наплавкой, как по прочности образовавшегося покрытия, так и по тепловому воздействию на деталь. На поверхность детали при напылении покрытия действует тепловой поток от струи плазмы $Q_{пл}$ и от напыляемого порошка материала покрытия $Q_{пор}$. При периодическом возбуждении электрической дуги происходит интенсивное проплавление покрытия в месте фиксации опорного пятна дуги за счет тепла $Q_{дуги}$. Общее количество теплоты определяется выражением:

$$Q = Q_{пл} + Q_{пор} + Q_{дуги}. \quad (1)$$

Для дальнейших расчетов проведена оценка КПД нагрева поверхности плазменной струей $\eta_{пл}$, напыляемым порошком $\eta_{пор}$ и электрической дугой $\eta_{дуги}$.

Оценка проводилась калориметрированием при электрической мощности плазматрона 15 кВт с расходом порошка типа ПГ-ХН80СР-3 до 8×10^{-4} кг/с и мощностью активирующей дуги 0,8 и 1,2 кВт с частотой пульсаций 50 Гц. Установлено, что общий КПД тепла от струи плазмы и порошка ($\eta_{пл} + \eta_{пор}$) составляет не более 6% при мощности активирующей дуги 0,8 кВт и не более 4% при мощности дуги 1,2 кВт.

В рассматриваемой физической модели нагревом от струи плазмы и порошка можно пренебречь и считать при этом, что образование проплавленных участков покрытия происходит только в момент фиксации пятна привязки электрической дуги на поверхности.

Нижнюю границу скорости перемещения плазматрона V_{min} относительно поверхности можно оценить из геометрических соображений. Условие отсутствия общей сварочной ванны (не реализуется процесс наплавки) соблюдается при наличии твердофазной границы между двумя последовательными оплавленными включениями, т.е. если скорость перемещения плазматрона равна:

$$V_{min} = 2r/t, \quad (2)$$

где r , t – соответственно, радиус пятна привязки электрической дуги и период пульсаций тока.

Период пульсаций тока t связан с частотой пульсаций f соотношением $f = 1/t$. Тогда

$$V_{min} = 2rf. \quad (3)$$

В конечном итоге частота пульсаций тока f , мощность импульса тока N , скорость передвижения плазматрона V решающим образом связаны с теплофизическими параметрами материала покрытия.

Тепловой поток на поверхность Q связан с мощностью N электрической дуги соотношением:

$$Q = hNt_{им}. \quad (4)$$

где h , $t_{им}$ – соответственно, термический КПД электрической дуги и длительность импульса тока электрической дуги.

Ввиду малого диаметра дуги и большой интенсивности энергии в пятне привязки дуги, процесс распространения тепла происходит от точечного источника мощностью $N(t)$ (рис. 2).

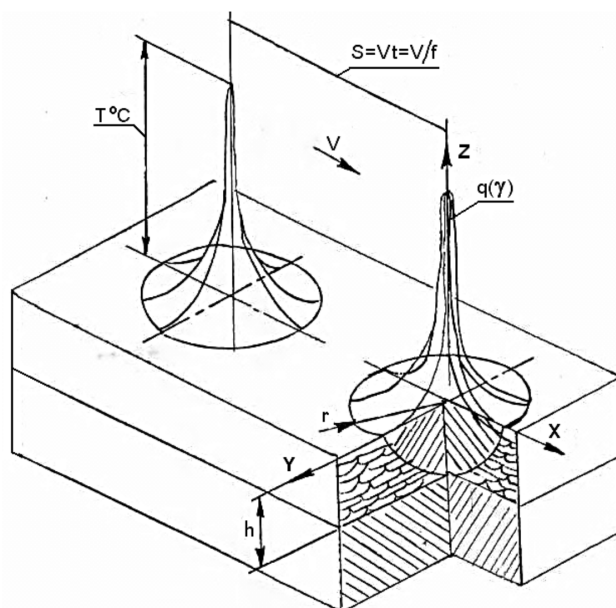


Рис. 2. Процесс распространения тепла от точечного источника

Для расчета теплового состояния элемента покрытия анализируется общее диф-

ференциальное уравнение теплопроводности:

$$c\rho \frac{dT}{dt} = \frac{d}{dx} \left(\lambda \frac{dT}{dx} \right) + \frac{d}{dy} \left(\lambda \frac{dT}{dy} \right) + \frac{d}{dz} \left(\lambda \frac{dT}{dz} \right), \quad (5)$$

при начальных условиях

$$\begin{aligned} T|_{t=0} &= Q/c\rho v; \\ T|_{x=0} &= T_o, \end{aligned} \quad (6)$$

и граничных условиях

$$\begin{aligned} \lambda(dT_{(0,t)}/dx) &= -Q; \\ T_{(\infty,t)} &= T_o; \\ (dT_{(0,t)}/dx) &= 0, \end{aligned} \quad (7)$$

где c , ρ , λ , Q – соответственно, удельная теплоемкость, плотность, коэффициент теплопроводности и тепловой поток на поверхности.

Подробное решение уравнения теплопроводности (5), приведенное в работе [5], позволило определить мощность выносной дуги.

Из условия, что температура на границе покрытия и подложки $R = h$ имеет значение $T = T_{пл}$, определяется мощность электрической дуги, необходимая для расплавления элемента объема покрытия толщиной h , при КПД дуги $\eta = 0,85$:

$$N = \frac{9,7 T_{пл} \lambda h^2}{\sqrt{\alpha \tau} \left[0,56 \exp(-R/2\sqrt{\alpha \tau})^2 - (R/2\sqrt{\alpha \tau}) (1 - \operatorname{erf}(R/2\sqrt{\alpha \tau})) \right]}. \quad (8)$$

Теплофизические константы материала покрытия принимаются с учетом пористости по правилу аддитивности физических свойств в изотропном теле:

$$\begin{aligned} \rho &= \rho_1 (V - PV) + \rho_b PV; \\ \alpha &= \alpha_1 (V - PV) + \alpha_b PV; \\ \lambda &= \lambda_1 (V - PV) + \lambda_b PV, \end{aligned} \quad (9)$$

где ρ , λ , α , ρ_1 , λ_1 , α_1 , ρ_b , λ_b , α_b – соответственно, плотность, температуропроводность, теплопроводность материала покрытия, жидкой фазы материала покрытия и воздуха, находящегося в порах покрытия; V – элемент объема покрытия; P – пористость покрытия.

Используя уравнения (9), была проведена оценка мощности электрической дуги, потребной для образования локальных точек проплавления толщиной, соответственно, 10^{-4} ; $2,5 \times 10^{-4}$; $5,0 \times 10^{-4}$; $7,5 \times 10^{-4}$ и 10^{-3} м при частотах 10, 25, 50, 100, 250 и 500 Гц.

Расплавленный элемент объема покрытия некоторое время находится в состоянии жидкой фазы. Длительность контактирования жидкой и твердой фаз материала покрытия и основы играет существенную роль на формирование структуры покрытия и, в конечном итоге, определяет прочность покрытия. Образование прочного металлургического соединения материалов возможно в том случае, если успевают пройти процессы развития физического контакта

между жидкой и твердой фазами материалов и химическое взаимодействие фаз.

Длительность контакта фаз t_k определяется следующим известным выражением:

$$t_k = t_p + t_d + t_{oz} + t_{pxc}, \quad (10)$$

где t_p – соответственно, время ретардации межфазной поверхностной энергии (время задержки диффузных переходов); t_d – время развития процессов гетеродиффузии до образования перенасыщенных твердых растворов; t_{oz} – время, необходимое для образования новых химических соединений; t_{pxc} – время дальнейшего роста химических соединений.

Ограничив время контакта t_k только первыми двумя слагаемыми уравнения (10), выполняется условие соединения материалов. Граница расплавленного объема материала покрытия, как показали металлографические исследования, представляет собой сферическую поверхность с центром в пятне привязки электрической дуги на поверхности.

Толщина покрытия h много меньше толщины детали H . В этом случае вся теплофизика процесса охлаждения определяется материалом детали.

Из предыдущего можно сделать следующие выводы: распределение тепла изотропно; тепловыми процессами в покрытии можно пренебречь, принять теплофизические параметры материала покрытия при температуре плавления.

Время контакта t_k фаз материала при условии, что в центре расплавленного объема покрытия ($x = 0$) достигается при охлаждении температура ($T(0, t_k) = T_{пл}$) плавления. Отсюда:

$$t_k = - \frac{36h^2 \rho}{\pi^2 D \lambda} \lg \frac{T_{пл}}{T_{max}}. \quad (11)$$

Образование прочного соединения фаз и чередование оплавленных включений в определенном порядке, заданном скоростью перемещения плазматрона относительно детали и частотой импульсов тока ЭДПМ, способствует формированию покрытия, обладающего свойствами композиционного материала. При этом образцы, напыленные с использованием выносной дуги, показали прочность сцепления $\sigma_{сч} = 100\text{--}120$ МПа вместо 30 МПа без использования выносной дуги.

Таким образом, реализация технологического процесса нанесения упрочненного покрытия возможна при известных значениях параметров: номинальная мощность импульса тока электрической дуги N ; длительность импульса тока t ; относительная скорость V перемещения плазматрона и поверхности детали; частота импульсов тока f .

Для промышленной реализации процесса нанесения покрытий с использованием выносной дуги приемлемой является мощ-

ность источника питания (ИП-2) дуги до 5 кВт при частоте до 500 Гц. При нанесении покрытий с использованием ЭДПМ происходит увеличение прочности материала покрытия и увеличение модуля упругости за счет дисперсных оплавленных включений.

Прочностные свойства дисперсных покрытий связаны с энергией их разрушения и размером трещин, предшествующим началу разрушения. Частицы в покрытии и материале поверхности детали обладают различными термоупругими свойствами, и в силу низких значений адгезионной и когезионной прочности покрытия, они могут служить источниками зарождения трещин. В задачах механики разрушения композиционных материалов исследуются вопросы зарождения трещин в композитах и распространение их по материалу. В ряде работ [4, 6] рассмотрены процессы разрушения композитов с дисперсными частицами в хрупкой матрице. При этом было отмечено, что «фронт трещины, движущейся в хрупком материале, на мгновение останавливается при встрече с включениями».

Экспериментальная проверка разработанного метода проводилась при испытании образцов на сжатие. Усилие сжатия прикладывалось в пределах 2% деформации образца, то есть в области упругости материала. Результаты испытаний приведены на рис. 3.

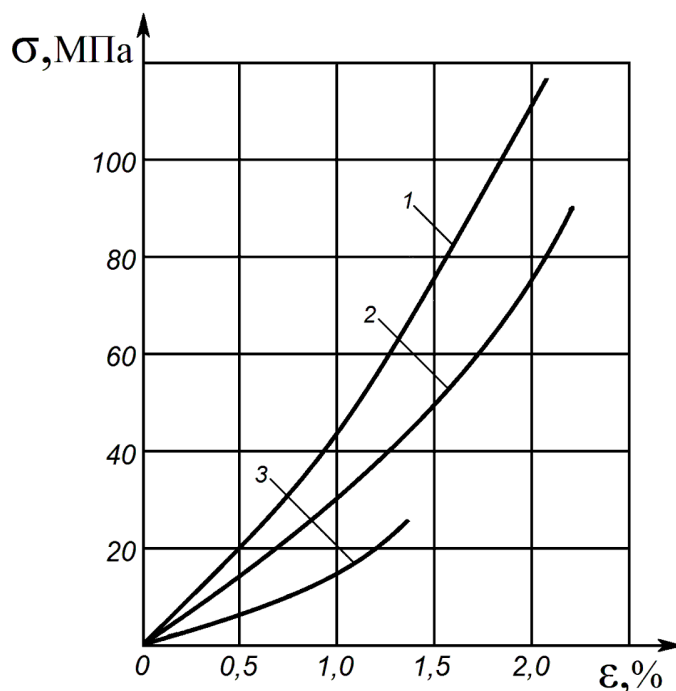


Рис. 3. Результаты испытаний на сжатие покрытий из материала ZrC: 1 – использование ЭДПМ по схеме 1 (анодная привязка дуги); 2 – использование ЭДПМ по схеме 2 (катодная привязка дуги); 3 – без использования ЭДПМ

Образцы, полученные без использования ЭДПМ, разрушались при деформации $\varepsilon = 0,014-0,018$, что соответствует напряжению 23-30 МПа. При этом образцы, полученные по схеме 1 (анодная привязка дуги), разрушались при нагрузке 100-120 МПа, т.е. прочность покрытия увеличилась в 3 раза за счет образования упорядоченной «каркасной» структуры.

Применение технологии плазменного напыления покрытий с использованием ЭДПМ дает возможность создавать элементы в покрытии, препятствующие распространению разрушений, а также разрабатывать технологические процессы нанесения антифрикционного покрытия, обладающие минимальным коэффициентом трения.

Процесс нанесения покрытий из механической смеси порошков металла и материала твердой смазки связан с определенными трудностями. Такие мелкодисперсные твердосмазочные материалы, как графит, молибденит, нитрид бора, фтороцианид меди и др. обволакивают частицы металла и препятствуют их прочному соединению между собой в составе покрытия и с поверхностью детали. Содержание порошка твердой смазки обычно не превышает 3...5% от объема материала покрытия. При большем содержании порошка твердой смазки в объеме покрытия резко снижается его адгезионная и когезионная прочность, вплоть до осыпания покрытия при содержании в нем 12...15% твердой смазки. Установлено, что только при 15...30% содержании твердой смазки проявляются уникальные антифрикционные свойства твердосмазочных материалов.

Выводы

1. Разработанная модель образования упрочненного двухфазного покрытия, теоретический расчет параметров нанесения покрытий, а также экспериментальная про-

верка рассмотренного метода позволили предложить к применению новый способ плазменного напыления с использованием электрической дуги пульсирующей мощности.

2. Предложенный метод воздействия на напыленный слой электрической дуги пульсирующей мощности, за счет образования упорядоченной «каркасной структуры», увеличивает контактную прочность покрытий в 3 раза и дает реальную возможность образования оплавленных слоев с минимальным температурным воздействием на основной материал. Промышленная реализация технологического процесса нанесения покрытий с использованием электрической дуги пульсирующей мощности возможна только при создании специальных источников питания и контрольно-измерительной аппаратуры, требования и основные технические параметры к которым определяются на основе анализа экспериментальных исследований.

Список литературы

1. Газотермические покрытия из порошковых материалов: справочник // Ю.С. Борисов, Ю.А. Харламов, С.Л. Сидоренко и др. – Киев: Наукова Думка, 1987. – 544 с.
2. Газотермическое напыление / кол. авторов; под общей ред. Л.Х. Балдаева. – М.: Маркет ДС, 2007. – 344 с.
3. Иванов Е.М. Движение и нагрев микрочастиц на начальном участке струи низкотемпературной плазмы / Е.М. Иванов, А.А. Углов, А.Г. Гнедовец // Физика и химия обработки материалов. – 1987. – № 3. – С. 54 – 60.
4. Максимович Г.Г., Шатинский В.Ф., Копылов В.И. Физико-химические процессы при плазменном напылении и разрушении материалов с покрытиями. – Киев: Наукова Думка, 1983. – 264 с.
5. Пузряков А.Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 360 с.
6. Соловьев Б.М., Герасимова Л.П., Красильников Г.Б. Особенности разрушения плазменных покрытий в условиях напряжений при повышенных температурах // Теория и практика газотермического нанесения покрытий. – Дмитров, 1989. – Том 2. – С. 181 – 190.