

МОДЕЛЬ КОНТАКТА ЧАСТИЦЫ ГАЗОТЕРМИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ С ШЕРОХОВОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ПОДЛОЖКИ

Лоскутов С.В., Ершов А.В., Зеленина О.А.

Запорожский национальный технический университет.

Рассмотрена модель сцепления частицы плазменного покрытия с шероховатой поверхностью подложки при плазменном напылении. Показано, что на микровыступах шероховатой подложки контактная температура поверхности оказывается выше, чем на гладкой подложке. Найден метод оценки положения изотермы контактной температуры на модели шероховатой поверхности в зависимости от времени контакта. Показано, что на стальной поверхности при нанесении стального покрытия положение изотермы плавления смещено относительно изотермы контактной температуры в сторону микровыступов подложки. Получены оценки относительной прочности сцепления покрытия в зависимости от высоты микровыступов и температуры подложки.

Ключевые слова: газотермическое напыление, подложка, контактная температура, нестационарный теплообмен, изотерма плавления, прочность сцепления.

Постановка проблемы. Несмотря на экономическую целесообразность восстановления деталей методом газотермического напыления, возможность повышения надежности, работоспособности и долговечности машин ограничена, поскольку прочность газотермических покрытий в настоящее время составляет только (10-15)% от прочности материала детали [1, 2]. Недостаточная прочность покрытий связана со сложными физическими процессами, протекающими при контакте частиц с подложкой. Наиболее важными из них являются процессы нагрева поверхности подложки до температуры плавления. Поэтому в работе рассматривается актуальная проблема – разработка теоретической модели влияния шероховатости поверхности на условие создания плавящегося контакта с частицей покрытия и на возможность повышения прочности сцепления частицы с подложкой.

Анализ последних исследований и публикаций. К методам повышения прочности относится ряд мероприятий, направленных на повышение температуры контактного взаимодействия частиц с поверхностью детали [2, 3]. Использование сверхзвуковой плазменной струи для разгона частиц дает не только повышение давления частицы на подложку, но и повышение контактной температуры вследствие нагрева частиц при их пластической деформации при столкновении с поверхностью. Химическая активация процесса заключается в использовании энергии химического нагрева частиц, например за счет добавления газообразного топлива в струю частиц металла. Повышение прочности достигается и путем дугового оплавления поверхности. Однако при этом неравномерное распределение температуры по глубине напыленного слоя не обеспечивает достаточного повышения прочности сцепления с подложкой. Развитием метода дугового оплавления поверхности является применение дуги пульсирующей мощности для послойного оплавления покрытия, что дает повышение прочности в 2-3 раза [4]. Однако при использовании этого метода появляется неоднородность свойств покрытия, возникающая при пульсации активирующей дуги. Повышение прочности сцепления достигается и при использовании ионно-микродуговой активации подложки, механизм которой заключается не только в ее нагреве активирующей дугой в режиме постоянного тока, но и в создании шероховатости на подложке при микровзрывах нестационарных катодных пятен при одновременном расплывании поверхностных оксидов [5].

Выделение не решенных ранее частей общей проблемы. Задачей исследований по улучшению

свойств покрытий является изучение механизма сцепления расплавленных частиц металла с поверхностью подложки и с поверхностью уже нанесенных слоев. При решении этой задачи еще недостаточно полно учитывается влияние характеристик шероховатости на поверхности подложки. Если применение дробеструйной активации, при которой создается шероховатость поверхности, считается необходимым как при плазменном, так и при электродуговом методе нанесения покрытий [1-3, 6, 7], то теоретические разработки, учитывающие влияние шероховатости поверхности подложки на контактную температуру, отсутствуют. Механизм влияния формы и высоты микрорельефа подложки на прочность покрытия теоретически не исследован.

Цель статьи. Главной целью этой работы является разработка модели сцепления покрытия с шероховатой поверхностью подложки при наличии плавящегося контакта между ними и оценка влияния шероховатости покрытия на прочность сцепления.

Изложение основного материала. В основе механизма сцепления используется представление об оплавлении вершин микровыступов при контакте с расплавленной каплей металла. С увеличением относительной площади оплавления микровыступов должна повышаться и прочность сцепления покрытия с подложкой. Для определения площади оплавления микровыступов следует решить задачу о нестационарной теплопроводности контактирующих поверхностей. При этом каплю металла и подложку можно считать полубесконечным телом, до того момента времени, пока тепловая волна не достигнет противоположной поверхности частицы покрытия [1, 2].

Оценим возможность заполнения микровпадин жидкой частицей. Для того, чтобы это случилось, при отсутствии смачивания холодной поверхности подложки, величина силы инерционного давления частицы должна превысить силу поверхностного натяжения расплавленного металла. Приравняв гидродинамическое давление частицы капиллярному давлению, найдем радиус заполнения капилляра:

$$\rho \frac{v^2}{2} = \frac{2\sigma}{R}, \quad (1)$$

где ρ , v , σ – плотность, скорость и коэффициент поверхностного натяжения частицы, R – радиус капилляра, заполняемого под действием силы гидродинамического давления:

$$R = \frac{4\sigma}{\rho v^2} \quad (2)$$

Расчет для стали при $\sigma = 1,85$ Н/м, [8].
 $\rho = 7,8 \cdot 10^3$ кг/м³, $v = 50$ м/с дает значение

$R = 3,76 \cdot 10^{-7}$ м. Таким образом, вблизи лобовой критической точки частицы жидкий металл даже при отсутствии смачивания с поверхностью будет достаточно глубоко проникать в микровпадины, поскольку радиус капли значительно меньше высоты микровыступов.

Зададим идеализированную форму шероховатости подложки в виде одинаковых треугольников с прямыми углами при вершинах и во впадинах. Такая поверхность может быть получена, например, при грубом шлифовании, дробеструйной обработке, при обработке резцом или металлическими щетками, рис. 1.

Для определения температурного поля микровыступа зададим тепловые потоки q_x и q_y вдоль координатных осей ОХ и ОУ. Для каждого из тепловых потоков можно применить модель расчета нестационарной теплопроводности для плоской стенки, а также использовать принцип суперпозиций температурных полей. Целью расчета является определение температуры на гранях микровыступа.

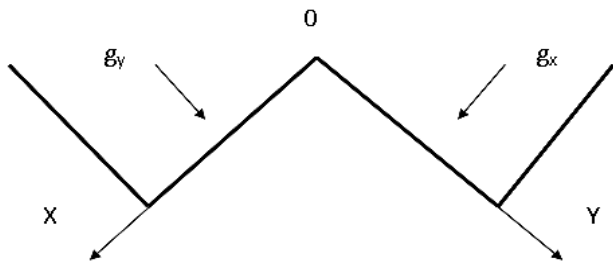


Рис. 1. Расчетная схема температурного поля микровыступа на подложке;
 q_x, q_y – плотности теплового потока вдоль осей ОХ и ОУ

Источник: разработано авторами

Рассмотрим нагрев грани микровыступа под действием теплового потока q_x , при контакте микровыступа с жидкой частицей. Для расчета температурного поля используется одномерное уравнение нестационарной теплопроводности [9]:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \quad (3)$$

где t – температура микровыступа, зависящая от времени нагрева τ и координаты x , $a = \lambda/\rho c$ – коэффициент температуропроводности, определяемый величинами теплопроводности λ , плотности ρ и теплоемкости подложки c .

Для решения уравнения (3) задаются граничные условия для частицы с начальной температурой t_1 и микровыступа с начальной температурой t_2 .

Зададим начальные и граничные условия для грани микровыступа

$$\begin{aligned} \tau = 0: t_2 = \text{const}2, t_1 = \text{const}1 \\ \tau > 0: x = 0; q_x = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x}; t = t_k; \\ x \geq \delta_2; t = t_2, \end{aligned} \quad (4)$$

где δ_2 – толщина зоны нестационарного нагрева микровыступа.

Уравнение (3) интегрируется в интервале $0 \leq x \leq \delta$ в виде

$$\frac{d}{d\tau} \int_0^{\delta_2} t dx = a \left(\frac{dt}{dx} \right)_{x=0} \quad (5)$$

Распределение температуры можно аппроксимировать в виде квадратного полинома [9]

$$t - t_2 = \frac{q_x}{2\lambda_2 \delta_2} (\delta_2 - x)^2, \quad (6)$$

где величина

$$\delta_2 = \sqrt{6a_2 \tau} \quad (7)$$

представляет глубину распространения тепловой волны в подложке. Здесь и ниже теплофизические коэффициенты подложки обозначаются индексом – «2», а коэффициенты частицы покрытия – индексом – «1»

На поверхности микровыступа, при $x = 0$, температура нагрева под действием теплового потока q_x , будет равна контактной температуре, величина которой определится исходя из (6):

$$t_k - t_2 = \frac{q_x}{2\lambda_2} \delta_2^2 \quad (8)$$

Для определения теплового потока в зоне контакта запишем формулу для перепада температуры в жидкой частице покрытия. Используя аналогию с формулой (8) получим:

$$t_1 - t_k = \frac{q_x}{2\lambda_1} \delta_1^2, \quad (9)$$

откуда находим плотность теплового потока в зоне контакта

$$q_x = 2\lambda_1 \frac{t_1 - t_k}{\delta_1^2} \quad (10)$$

Подставив (10) в (8), находим формулу для определения контактной температуры, которая согласуется с соответствующей формулой для случая идеального теплового контакта двух плоских поверхностей [10]

$$t_k = \frac{t_1 + t_2 \sqrt{\frac{\rho_2 c_2 \lambda_2}{\rho_1 c_1 \lambda_1}}}{1 + \sqrt{\frac{\rho_2 c_2 \lambda_2}{\rho_1 c_1 \lambda_1}}} \quad (11)$$

Если покрытие и подложка являются однородными металлами, то соотношение их теплофизических характеристик будет близким к единице. Сплавление покрытия с подложкой произойдет, если контактная температура достигнет температуры плавления подложки, однако это достигается не всегда. Наличие шероховатости поверхности подложки приводит к повышению температуры на вершинах микровыступов по сравнению с контактной температурой для плоской стенки, вследствие двухстороннего нагрева микровыступа одинаковыми по величине тепловыми потоками q_x и q_y .

Рассмотрим изменение температурного поля в зоне контакта жидкой частицы с шероховатостью поверхности. Если в начальный момент контактная температура, определяемая формулой (11), расположена на границе профиля шероховатости подложки, то через некоторое время линия, определяющая положение контактной температуры станет параллельной линии вершин микровыступов или плоскости поверхности подложки. Здесь используется предположение о контакте двух полубесконечных тел при бесконечном времени контакта. Если теплофизические свойства покрытия и подложки одинаковы, линия контактной температуры, исходя из условия симметрии, должна проходить посередине высоты каждого микровыступа, рис. 2.

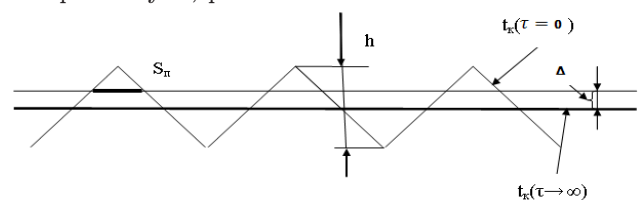


Рис. 2. Трансформация положения линии контактной температуры во времени

Источник: разработано авторами

На поверхностях микровыступов, расположенных выше медианной линии контактной температуры, которая соответствует $t_k (\tau \rightarrow \infty)$, температура будет выше, чем контактная. Используя формулу для теплового потока в конечных разностях, оценим положение изотермы плавления подложки. Она будет смещена вверх относительно линии $t_k (\tau \rightarrow \infty)$ на величину пропорциональную разности температур плавления и контакта

$$\Delta = \lambda_2 \frac{(t_n - t_k)}{q_1} = \frac{(t_n - t_k)\lambda_2}{2(t_1 - t_k)\lambda_1} \delta_1, \quad (12)$$

где t_n – температура плавления подложки.

Смещение температуры плавления относительно контактной температуры приводит к уменьшению площади поперечного сечения микровыступа, которое определяет прочность сцепления между верхней «сплавленной» с покрытием частью микровыступа и телом подложки. Площадь сечения зоны сплавления определится:

$$S_n = \frac{1}{2} S_0 \left(1 - \frac{2\Delta}{h}\right) \quad (13)$$

где S_0 – площадь основания микровыступа, h – его высота.

Исходя из соотношений сечений S_n и S_0 находится относительная несущая прочность сцепления покрытия с подложкой:

$$\frac{\sigma}{\sigma_2} = \frac{S_n}{S_0} = 0,5 - \frac{\Delta}{h} \quad (14)$$

Таким образом, микровыступы на подложке являются центрами сплавления, поскольку температура их поверхности превосходит температуру плавления.

Анализ полученных результатов. Расчетная оценка относительной прочности сцепления, выполненная по формулам (12)-(14) приведена в табл. 1. Расчет выполнялся при толщине частицы покрытия 100 мк в зависимости от высоты микронеровностей и температуры подложки. Температура частиц покрытия принималась равной температуре кипения стали 2735°C. Поскольку смещение изотермы плавления – Δ относительно изотермы средней контактной температуры зависит только от температуры подложки и покрытия (12), то при повышении температуры подложки до 200°C, прочность сцепления возрастает согласно (14), асимптотически стремясь к значению 0,5.

Повышение относительной прочности наблюдается и при увеличении высоты микровыступов, особенно при низкой температуре подложки. Однако поскольку к допущениям принятой модели относятся ограничение высоты микронеровностей в пределах примерно половины толщины частицы покрытия, то расчет при $h > 60$ мк не проводился. При уменьшении высоты микровыступов относительная прочность сцепления снижается, а уже при высоте $h = 2\Delta$, согласно (13), плавящийся контакт частиц невозможен, поскольку контактная температура на поверхности микровыступа будет ниже температуры плавления.

Теоретические значения относительной прочности сцепления близки к экспериментальным величинам, полученным при применении защитной атмосферы аргона в процессе нанесения покрытия [2]. Однако, выполненные оценки относительной прочности примерно в два раза выше экспериментальных величин, при нанесении покрытий в воздушной среде и применении технологии дробеструйной активации поверхности [1-3]. Одной из причин отличий теоретических и экспериментальных результатов является наличие оксидной пленки на поверхности подложки [5]. При этом возникает дополнительное температурное сопротивление в зоне контакта.

Модель плавящегося контакта частицы покрытия с шероховатой подложкой объясняет сцепление с поверхностью при любых температурах подложки, в том числе и при 0°C, в то время как на плоской стальной подложке теоретическое значение контактной температуры достигает температуры плавления только при температуре подложки более 300°C. Однако практически покрытия наносятся при температуре подложки меньше 150°C во избежание ее интенсивного окисления, что показывает необоснованность применения теоретической модели гладкой подложки для оценки прочности сцепления.

Развитие данной работы возможно в направлении оценок влияния краевых эффектов температурного поля на поверхности подложки и влияния поверхностных оксидов на снижение прочности сцепления. Данная модель нуждается в уточнении при значительном отличии теплофизических свойств материалов покрытия и подложки.

Выводы и рекомендации:

1. Модель контакта покрытия с шероховатой подложкой объясняет сцепление стальных частиц со стальной поверхностью при рекомендуемом ограничении температуры поверхности до 150°C в то время, как при этом условии, температура гладкой подложки оказывается ниже температуры плавления и сплавление частиц невозможно.

2. Теоретическая оценка дает завышенные значения прочности сцепления по сравнению с практической прочностью. Причина расхождений может быть связана с наличием оксидной пленки на поверхности подложки, а также в возможном влиянии краевого эффекта на снижение прочности сцепления, которое не учитывалось в расчетной модели.

3. Согласно полученной оценке, максимальная теоретическая прочность сцепления стального покрытия со стальной подложкой, при начальной температуре 200°C и без применения активации процесса напыления, составляет менее половины прочности подложки. Для повышения прочности сцепления при низкой температуре подложки рекомендуется увеличить высоту шероховатости и разработать способы ее очистки от поверхностных оксидов.

Таблица 1

Оценка относительной прочности сцепления в зависимости от температуры подложки и высоты микровыступов

$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	$t_k, ^\circ\text{C}$	$\Delta, \text{мк}$	$h=20 \text{ мк}$	$h=30 \text{ мк}$	$h=40 \text{ мк}$	$h=50 \text{ мк}$	$h=60 \text{ мк}$
				$\frac{\sigma}{\sigma_0}$	$\frac{\sigma}{\sigma_0}$	$\frac{\sigma}{\sigma_0}$	$\frac{\sigma}{\sigma_0}$	$\frac{\sigma}{\sigma_0}$
2735	0	1367	4,87	0,257	0,338	0,379	0,403	0,419
	50	1392	3,96	0,302	0,368	0,401	0,421	0,434
	100	1417	3,16	0,342	0,394	0,421	0,437	0,447
	150	1442	2,23	0,389	0,426	0,444	0,455	0,463
	200	1467	1,3	0,435	0,457	0,467	0,474	0,478

Список литературы:

1. Кудинов В. В., Иванов В. М. Нанесение плазмой тугоплавких покрытий // М.: Машиностроение, 1981. – 192 с.
2. Корж В. М. Нанесения покрытия / В. М. Корж, В. Д. Кузнецов, Ю. С. Борисов, К. А. Ющенко – К: Аристей, 2005. – 204 с.
3. З. Борисов Ю.С. Газотермические покрытия из порошковых материалов/ Ю.С. Борисов, Ю.А. Харламов. – Киев: Наукова Думка, 1987. – 210 с.
4. Свид. ВНТИЦ № 7090000091 Способ нанесения плазменных покрытий с использованием электрической дуги пульсирующей мощности на цилиндрических деталях, повышающий прочность и плотность покрытий. Зиновьева Т. Ю. / Опубликовано 06.07.99 г.
5. Ершов А. В. Влияние ионно-микродуговой активации подложки на прочность сцепления газотермических покрытий / А. В. Ершов, Н. Н. Сытников, Г. И. Камель // Вісник СевНТУ: зб. наук. пр. Вип. 118/2011. Серія: Машиноприладобудування та транспорт. – Севастополь. – 2011. – С. 32-36.
6. Строганов А. И. Влияние шероховатости стальной подложки на прочность сцепления с плазменным покрытием / А. И. Строганов, А. С. Дробышевский, А. Б. Гоц // Порошковая металлургия. – 1982. – № 10. – С. 91-94.
7. Медведев Ю. А. О влиянии шероховатости и степени наклепа на прочность сцепления плазменных покрытий / Ю. А. Медведев, И. А. Морозов // Физика и химия обработки материалов. – 1975. – № 4. – С. 27-30.
8. Курдюмов А. В. Литейное производство цветных и редких металлов / А. В. Курдюмов, М. В. Пикунов, В. М. Чурсин // М., Металлургия. – 1982. – 352 с.
9. Урюков Б. А. Теория эрозии электродов в нестационарных пятнах электрической дуги / Б. А. Урюков // Экспериментальное исследование плазмотронов – Новосибирск: Наука. – 1977. – С. 371-383.
10. Карслоу Г. Теплопроводность твердых тел / Г. Карслоу, Д. Егер пер. с нем. – М.: Наука, 1964. – 282 с.

Лоскутов С.В., Ершов А.В., Зеленіна О.А.

Запорізький національний технічний університет.

МОДЕЛЬ КОНТАКТУ ЧАСТИНКИ ГАЗОТЕРМІЧНОГО ПОКРИТТЯ З ШОРСТКОЮ ПОВЕРХНЕЮ ПІДКЛАДКИ

Анотація

Розглянуто модель зчеплення частинки плазмового покриття з шорсткою поверхнею підкладки при плазмовому напиленні. Показано, що на мікроступах шорсткої підкладки температура контакту на поверхні виявляється вищою, ніж на гладкій підкладці. Знайдено метод оцінки положення ізотерми контактної температури на моделі з шорсткою поверхнею в залежності від часу контакту. Показано, що на сталевій поверхні при нанесенні сталевого покриття положення ізотерми плавлення зміщено відносно ізотерми температури контакту в бік мікроступів підкладки. Отримано оцінки відносної міцності зчеплення покриття в залежності від висоти шорсткості і температури підкладки.

Ключові слова: газотермічне напилення, підкладка, контактна температура, нестационарний теплообмін, ізотерма плавлення, міцність зчеплення.

Loskutov S.V., Yerшов A.V., Zelenina E.A.

Zaporizhzhya National Technical University

THE MODEL OF CONTACT OF THE PARTICLES OF THE THERMAL SPRAY COATING WITH A ROUGH SURFACE OF THE SUBSTRATE

Summary

A model of particle coupling plasma coating with a rough surface of the substrate during plasma spraying. It is shown that the microtips substrate contact surface temperature is higher than a smooth surface. Found isotherm method for estimating the position of the contact temperature, the rough surface model depending on the contact time. It is shown that the steel surface of the steel when applied coating melting isotherm position offset relative to the contact temperature isotherm microprotrusion side substrate. We obtain estimates of the relative strength of the adhesion of the coating depending on the height and roughness of the substrate temperature.

Keywords: gas-thermal spraying, the substrate, the contact temperature, transient heat transfer, melting isotherm, the adhesion strength.