

# IV МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ В МЕТАЛУРГІЇ ТА МАШИНОБУДУВАННІ

УДК 533.924; 621.793.7

Д-р физ.-мат. наук С. В. Лоскутов, д-р техн. наук А. В. Ершов, Е. А. Зеленина  
Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье

## ТЕПЛООБМЕН ПРИ ДЕФОРМАЦИИ ЖИДКОЙ ЧАСТИЦЫ ГАЗОТЕРМИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ

*Рассмотрено влияние конвективного теплообмена в деформирующейся частице покрытия на уровень и распределение температуры в зоне контакта частицы с подложкой. В отличие от случая неподвижного контакта частицы с подложкой, когда температура на всей площади контакта оказывается постоянной, влияние конвективного теплообмена приводит к неравномерному распределению температуры с максимумом в центре контакта. Показано, что уровень максимальной температуры контакта Fe-Fe существенно превышает температуру плавления подложки. Обнаружено, что при отсутствии вязкого трения и связанной с ним диссипации энергии в деформирующейся частице покрытия, скорость частицы не оказывает влияния на уровень контактной температуры.*

**Ключевые слова:** плазменное напыление, подложка, контактная температура, конвективный и нестационарный теплообмен, прочность сцепления, деформация.

### Введение

При нанесении плазменных покрытий наиболее важными характеристиками являются прочность сцепления и когезионная прочность. Существенным недостатком покрытий является низкая прочность сцепления, которая не превосходит 10–20 % от минимальной прочности металла в контактной паре [1, 2]. Прочность сцепления зависит от параметров в зоне контакта, таких как температура и давление. Существующие методы оценки контактной температуры используют модель неподвижного контакта частиц с подложкой [1]. При этом уровень контактной температуры оказывается значительно ниже температуры плавления подложки. Указанный подход является, по-видимому, предварительной оценкой, поскольку не учитывает движение жидкой частицы в окрестности лобовой критической точки и вдоль поверхности подложки при ее деформировании под действием инерционных сил. Учет деформации частицы приводит к повышению интенсивности теплообмена и уровня контактной температуры, поскольку к кондуктивному теплообмену добавляется теплообмен конвективный, который связан с движением жидких слоев. А оценка реальной контактной температуры с использованием предположения об определяющей роли конвективного теплообмена является важной для уточнения механизма связи между частицами и подложкой.

### Физическая модель

Для определения температуры контакта частицы с подложкой используется баланс тепловых потоков в зоне контакта, который можно представить в виде равенства плотности тепловых потоков, проходящих через зону контакта от частицы к подложке. Нагрев подложки за счет конвективного теплообмена с жидкой частицей осуществляется тепловым потоком с плотностью

$$q_1 = -\alpha(t_1 - t_k), \quad (1)$$

где  $q_1$  плотность теплового потока, выходящего из частицы покрытия,  $t_1$  и  $t_k$  – начальная температуры частицы и зоны контакта на поверхности подложки;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи между жидкой частицей и подложкой.

Плотность теплового потока при нестационарном нагреве связана с температурой поверхности подложки и временем ее нагрева в соответствии с формулой [3]

$$q_2 = -\frac{\lambda_2(t_k - t_2)}{\sqrt{\pi a_2 \tau}}, \quad (2)$$

где  $q_2$  – плотность теплового потока, входящего в поверхность подложки;  $\lambda_2$  и  $a_2$  – теплопроводность и температуропроводность подложки;  $t_2$  и  $t_k$  – началь-

ная температура подложки и температура зоны контакта с частицей покрытия,  $\tau$  – время контакта. Величина

$$\delta_2 = \sqrt{\pi \alpha_2 \tau} \quad (3)$$

представляет длину тепловой волны в подложке. Приравнивая тепловые потоки (1) и (2) и учитывая (3), получим соотношение

$$q_2 = -\frac{\lambda_2(t_k - t_2)}{\delta_2} = -\alpha(t_1 - t_k). \quad (4)$$

Преобразование формулы (4) определяет величину контактной температуры в виде

$$t_k = \frac{t_1 + \frac{\lambda_2}{\alpha \delta_2} t_2}{1 + \frac{\lambda_2}{\alpha \delta_2}}. \quad (5)$$

Коэффициент теплоотдачи зависит от характера обтекания подложки при деформации частицы покрытия, которая показана на рис. 1.

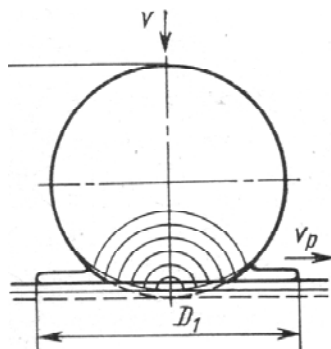


Рис. 1. Схема деформации сферической частицы при растекании на поверхности подложки

При этом следует выделить две характерные зоны. Центральная зона, в которой преобладает поперечное направление скорости жидкости, называется окрестностью лобовой критической точки. Ее размер ограничен радиусом недеформированной частицы. Периферийная зона деформирующейся частицы, в которой скорость направлена вдоль поверхности подложки, является зоной растекания.

Зависимости коэффициента теплоотдачи между жидкой частицей и подложкой для каждой зоны отличаются друг от друга и определяются критерием Нуссельта. Для окрестности лобовой критической точки на плоской поверхности критерий Нуссельта имеет вид [4]

$$Nu = \frac{\alpha \cdot r}{\lambda_1} = 0,7 \cdot Re^{0,5} Pr^{0,4}, \quad (6)$$

где  $Re = \rho v r / \mu$  и  $Pr = \mu c / \lambda$  – критерии Рейнольдса и Прандтля,  $\rho$ ,  $v$ ,  $r$  – плотность, скорость и радиус части-

цы,  $\mu$ ,  $c$ ,  $\lambda$  – динамическая вязкость, теплоемкость и теплопроводность частицы. Расчет критерия Прандтля согласно данным теплофизических констант для жидкой стали [5] дает  $Pr = 0,245$  при  $\mu = 5,5 \cdot 10^{-3}$  Па·с,  $c = 760$  Дж/кг·К,  $\lambda = 17$  Вт/м·К.

Преобразование величины  $B = \lambda_2 / \alpha \delta_2$  выполнялось с учетом (6) и в предположении о том, что время нагрева подложки равно времени деформации частицы со скоростью ее падения на подложку  $u_1$ . Деформация происходит от величины  $2r_1$ , где  $r_1$  – начальный радиус частицы, до толщины деформированной частицы –  $h$ , что дает формулу  $B_0$  для зоны лобовой критической точки в виде

$$\begin{aligned} B_0 &= \frac{\lambda_2}{\alpha \cdot \delta_2} = \frac{\lambda_2 \cdot r_1}{\lambda_1 \cdot Nu \cdot \delta_2} = \\ &= \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \cdot \frac{r_1}{0,7 \sqrt{\frac{\rho_1 \cdot u_1 \cdot r_1}{\mu_1} \cdot \left(\frac{\mu_1 \cdot c_1}{\lambda_1}\right)^{0,4}} \sqrt{\pi \frac{\lambda_2}{\rho_2 \cdot c_2} \cdot \frac{2r_1 - h}{u_1}}} = \\ &= \sqrt{\frac{r_1}{2r_1 - h}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_2 \cdot c_2 \cdot \lambda_2}{\rho_1 \cdot c_1 \cdot \lambda_1}} \cdot \frac{Pr^{0,1}}{0,7 \sqrt{\pi}} = 0,73 \sqrt{\frac{\rho_2 \cdot c_2 \cdot \lambda_2}{\rho_1 \cdot c_1 \cdot \lambda_1}} \cdot \frac{0,88}{1,24} = \\ &= 0,518 \cdot \sqrt{\frac{\rho_2 \cdot c_2 \cdot \lambda_2}{\rho_1 \cdot c_1 \cdot \lambda_1}}. \end{aligned} \quad (7)$$

При вычислении принималось, что  $h = r_1 / 8$ , [1]. Зона лобовой критической точки ограничена радиусом сферической частицы.

При деформации капли покрытия в зоне растекания за пределами лобовой критической точки, течение жидкости направлено параллельно поверхности подложки, рис. 1. Конвективный теплообмен в этой зоне соответствует случаю течения на плоской пластине [6], при котором критерий Нуссельта определяется формулой

$$Nu = \frac{\alpha \cdot r}{\lambda_1} = 0,332 \cdot Re^{0,5} Pr^{0,33}. \quad (8)$$

Следует отметить, что в отличие от зоны лобовой критической точки, где коэффициент теплоотдачи является постоянным [4], в зоне растекания капли коэффициент теплоотдачи снижается обратно пропорционально  $r^{0,5}$ .

Оценим конечный радиус деформированной частицы. Согласно [1], ее толщина примерно в 8 раз меньше ее радиуса –  $R$ . Тогда условие постоянства объемов сферической и деформированной частицы радиусом  $R$  имеет вид

$$4\pi \cdot r_1^3 / 3 = \pi \cdot R^3 / 8,$$

откуда получим, что радиус деформированной частицы на 10 % превышает ее первоначальный сферический диаметр  $R = 1,1 d$ .

В зоне растекания при  $r_1 < r < R$ , где  $R$  – конечный радиус деформированной частицы, время нагрева под-

ложки равно времени деформации частицы на величину  $R-r$  со скоростью ее падения на подложку  $u_1$ . Тогда величина  $B_p = \lambda_2 / \alpha \delta_2$  для зоны растекания капли определится

$$B_p = \frac{\lambda_2 \cdot (r - \Delta)}{\lambda_1 \cdot 0,332 \sqrt{\frac{\rho \cdot u \cdot (r - \Delta)}{\mu}} \cdot \text{Pr}^{0,33} \sqrt{\pi \cdot \frac{\lambda_2}{\rho_2 \cdot c_2} \cdot \frac{R - r}{u}}} =$$

$$= \sqrt{\frac{r}{R - r}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_2 \cdot c_2 \cdot \lambda_2}{\rho_1 \cdot c_1 \cdot \lambda_1}} \cdot \frac{\text{Pr}^{0,17}}{0,332 \sqrt{\pi}} =$$

$$= 1,34 \cdot \sqrt{\frac{r - \Delta}{R - r}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_2 \cdot c_2 \cdot \lambda_2}{\rho_1 \cdot c_1 \cdot \lambda_1}}, \quad (9)$$

где  $\Delta$  – смещение начала зоны продольного растекания капли относительно ее центра. Величина  $\Delta$  определится из условия равенства формул (8) и (9) для коэффициентов  $B_0$  и  $B_p$  при  $r = r_1$ ,  $\Delta = 0,82 r_1$ .

### Анализ результатов

Для расчета контактной температуры принималась температура частицы покрытия равной температуре кипения стали 2735 С, в соответствии с результатами калориметрических измерений [7]. Температура подложки изменялась от 0 до 150 °С, поскольку нагрев до большей температуры не рекомендован вследствие интенсивного окисления поверхности [1]. Учитывалось снижение теплопроводности стали при плавлении [5].

Результаты расчета контактной температуры по радиусу деформированной частицы падающей на подложку со скоростью 100 м/с и начальным радиусом 90 мкм приведены в табл. 1. В соответствии с результатами расчета влияние конвективного теплообмена при растекании жидкой частицы покрытия приводит к неравномерному распределению контактной температуры по радиусу деформированной частицы, в отличие от равномерного распределения контактной температуры при отсутствии конвекции. Наибольшая интенсивность теплообмена наблюдается в окрестности лобовой критической точки, где полученная контактная температура превышает температуру плавления подложки при ее начальной температуре в интервале (0 – 150) °С.

**Таблица 1** – Изменение контактной температуры по радиусу деформированной частицы при изменении начальной температуры подложки в интервале  $t_2 = (0 - 150)$  °С

$r$ , мкм	0	25	50	75	100	125	150	175	200
$B$	0,69	0,69	0,69	0,69	0,905	1,44	2,19	3,56	$\infty$
$t_{к}$ , °С при $t_2 = 0$ °С	1618	1618	1618	1618	1435	1121	860	598	0
$t_{к}$ , °С при $t_2 = 50$ °С	1639	1639	1639	1639	1459	1150	894	637	50
$t_{к}$ , °С при $t_2 = 100$ °С	1659	1659	1659	1659	1483	1180	928	676	100
$t_{к}$ , °С при $t_2 = 150$ °С	1680	1680	1680	1680	1507	1209	952	715	150

Радиус зоны плавления подложки составляет 45 % от радиуса деформированной частицы и увеличивается с возрастанием температуры подложки, а доля площади плавящегося контакта близка к 20 %. Снижение контактной температуры в зоне растекания происходит по двум причинам. Во-первых, это уменьшения плотности конвективного теплового потока по мере возрастания толщины пограничного слоя в жидкой частице, и, во-вторых, это уменьшение времени теплового контакта до момента затвердевания частицы.

В расчетах пренебрегалось влиянием тепловыделения при торможении частицы на площадке контакта, что допустимо при напылении в дозвуковой плазменной струе. При этом обнаружено отсутствие влияния скорости частицы на температуру контакта, как в лобовой критической точке, так и в зоне растекания частицы. Полученный результат можно объяснить тем, что повышение интенсивности конвективного теплообмена при возрастании скорости частицы компенсируется уменьшением времени торможения и растекания частицы на подложке.

### Выводы

1. Показано, что наличие конвективного теплообмена при контакте частицы покрытия с подложкой приводит к существенной неоднородности распределения контактной температуры по радиусу деформированной частицы в отличие от равномерного распределения контактной температуры при отсутствии конвекции и деформации частицы на подложке.

2. В отличие от модели теплообмена недеформируемой частицы, влияние конвекции приводит к повышению контактной температуры в центральной зоне до температуры превышающей температуру плавления подложки при ее начальной температуре в интервале (0–150) °С. Радиус зоны плавления подложки составляет примерно 45 % от радиуса деформированной частицы, а доля площади плавящегося контакта равна 20 %.

3. Обнаружено, что при отсутствии вязкого трения и связанной с ним диссипации энергии в деформирующейся частице покрытия, что характерно для дозвуковых скоростей плазменной струи, скорость дефор-

мировання частини не оказує впливу на рівень контактної температури як в лобовій критичній точці, так і в зоні растекання частини, оскільки підвищення інтенсивності конвективного теплообміну при зростанні швидкості частини компенсується зменшенням часу деформації частини при контакті з підложкою.

#### Список літератури

1. Кудинов В. В. Нанесення плазмою тугоплавких покриттів / Кудинов В. В., Иванов В. М. – М. : Машиностроение, 1981. – 192 с.
2. Нанесення покриття / [Корж В. М., Кузнецов В. Д., Борисов Ю. С., Ющенко К. А.] – К. : Аристей, 2005. – 204 с.
3. Пехович А. И. Расчеты теплового режима твердых тел / Пехович А. И., Жидких В. М. – Л. : Энергия, 1976. – 352 с.
4. Шоек П. А. Исследование баланса энергии на аноде сильно-точных дуг, горящих в атмосфере аргона / Шоек П. А. // Современные проблемы теплообмена. – М. : Энергия, 1966. – 386 с.
5. Курдюмов А. В. Литейное производство цветных и редких металлов / Курдюмов А. В., Пикунов М. В., Чурсин В. М. – М. : Металлургия. – 1982. – 352 с.
6. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике / [Авдеевский В. С., Галицкий Б. М., Глебов Г. А. и др.] ; под ред. В. К. Кошкина. – М. : Машиностроение – 1975. – 624 с.
7. Ершов А. В. Влияние экзотермических процессов на термодинамические характеристики при плазменном распылении металлических токопроводящих проволок / Ершов А. В., Быковский О. Г., Лаптева А. Н. // Физика и химия обработки материалов. – 2014. – № 1. – С. 21–24.

Одержано 27.04.2015

#### Лоскутов С.В., Ершов А.В., Зеленіна О.А. Теплообмін при деформації рідкої частинки газотермічного покриття

*Розглянуто вплив конвективного теплообміну у частинці покриття, що деформується, на рівень і розподіл температури в зоні контакту частинки з підкладкою. На відміну від випадку нерухомого контакту частинки з підкладкою, коли температура на всій площі зчеплення є постійною, вплив конвективного теплообміну призводить до нерівномірного розподілу температури з максимумом у центрі контакту. Показано, що рівень максимальної температури контакту Fe-Fe істотно перевищує температуру плавлення підкладки. Виявлено, що при відсутності в'язкого тертя і пов'язаної з ним дисипації енергії у частинці покриття, швидкість частинки не впливає на рівень контактної температури.*

**Ключові слова:** плазмове напилення, підкладка, контактна температура, конвективний і нестационарний теплообмін, міцність зчеплення, деформація.

#### Loskutov S., Ershov A., Zelenina E. Heat transfer in strain liquid particles thermal coatings

*The influence of convective heat transfer in a deformable particle coating on the level and the temperature distribution in the contact area with the substrate particles is studied. In contrast to the fixed contact of the particle with the substrate when the temperature at the contact area is constant, the influence of convective heat transfer leads to uneven temperature distribution with a maximum at the center of the contact. It is shown that the level of the maximum temperature of the contact Fe-Fe greatly exceeds the melting point of the substrate. It has been found that in the absence of viscous friction and the associated energy dissipation in the deformable particle coating, the particle velocity has no effect on the level of the contact temperature.*

**Key words:** plasma spraying, the substrate, the contact temperature, convection and unsteady heat transfer, adhesive strength, deformation.