

Секция 6. Моделирование физико-химических процессов в современных технологиях.  
Математическое моделирование.

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМЕ ЧАСТИЦА-ПОДЛОЖКА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

*Б.С. Зенин, к.ф.-м.н., доцент,*

*Ю.А. Храповская, студент гр. 4БМ31*

*Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина 30*

*тел.(3822) 56-41-14*

*E-mail: ylia-kallipso@mail.ru*

Современное машиностроение предъявляет к материалам особые требования. Это связано с повышенными нагрузками на детали машин и механизмов, поэтому практически все детали при их изготовлении включают в себя обязательный этап дополнительной поверхностной обработки. Среди активно используемых технологий упрочнения поверхности методы газотермического напыления покрытий представляют несомненный интерес [1].

Напыление покрытия на поверхность детали представляет собой процесс нанесения с помощью высокотемпературной скоростной струи дисперсного порошка или капель расплавленного напыляемого материала, осаждающегося на основном металле при ударном столкновении с его поверхностью. Качество газотермических покрытий, в значительной степени зависит от адгезии напыляемых частиц. Величина адгезии определяется целым рядом условий, среди которых теплофизические условия играют ведущую роль. Таким образом, можно считать, что образование прочной связи частицы с подложкой происходит в результате термически активируемого процесса химического взаимодействия материалов частицы и основы в контакте [2]. В качестве характеристики термического процесса взаимодействия частицы с подложкой можно рассматривать термический цикл в контакте (рис. 1), который показывает изменение температуры со временем. Время  $t_0$ , которое соответствует времени кристаллизации расплавленной частицы на подложке, обеспечивает наибольший прогрев поверхностного слоя подложки.

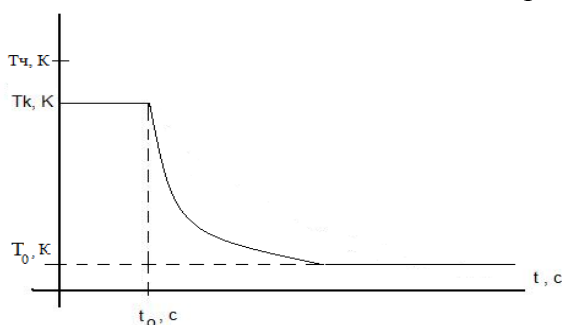


Рис. 1. Термический цикл в контакте напыленная частица – подложка.

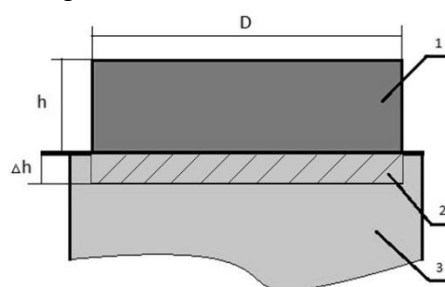


Рис. 2. Схема формирования сплета: 1 – сплет, 2 – «горячий» слой, 3 – подложка.

Цель настоящей работы – рассмотреть характер распределения тепловой энергии и провести ее количественную оценку в системе напыленная частица – подложка в момент завершения кристаллизации частицы. В общем случае можно рассматривать четыре варианта условий взаимодействия движущейся со скоростью  $v$  частицы с подложкой (А):

$$T_q > T_{mч} \quad (\text{частица расплавлена и перегрета, } T_q = T_{mч} + \Delta T)$$

$$T_u = T_{m\text{ ч}} \text{ (частица расплавлена)}$$

$$T_u = T_{m\text{ ч}} \text{ (частица не расплавлена)}$$

$$T_u < T_{m\text{ ч}} \text{ (частица не расплавлена, } T_u = T_{m\text{ ч}} - \Delta T),$$

Здесь  $T_{m\text{ ч}}$  – температура плавления частицы. В соответствии с законом сохранения энергии запишем уравнение баланса энергии в системе частица-подложка до и после столкновения

$$W_k + Q_{T0\text{ ч}} = Q_u + Q_n + \Delta W \tag{1}$$

где  $W_k$  - кинетическая энергия частицы в момент встречи ее с подложкой,  $Q_{T0\text{ ч}}$  - тепловая энергия аккумулированная в напыляемой частице,  $Q_u$  - тепловая энергия, сохраняемая в частице к моменту полной кристаллизации,  $Q_n$  - тепловая энергия, переданная в подложку,  $\Delta W$  – потери энергии.

Пренебрегая потерями  $\Delta W$  и считая, что кинетическая энергия переходит в тепло, будем рассматривать уравнение (1), как уравнение теплового баланса, слагаемые которого для каждого из четырех вариантов (А) определяются отдельно. Учитывая важную роль поверхности в создании адгезионной связи покрытия с основой, выделим в подложке поверхностный слой, температура которого отличается от контактной температуры (рис. 2) не более чем на  $30^0$ , и назовем его «горячим» слоем. С учетом принятых допущений и условий для варианта (2А) уравнение теплового баланса можно представить в виде

$$W_k + Q_{T\text{ ч}} + Q_L = Q_u + Q_{\text{гсл}} + Q_{\text{ост}}, \tag{2}$$

где  $Q_{T\text{ ч}}$  – энергия, определяемая температурой нагрева частицы,  $Q_L$  - скрытая теплота кристаллизации,  $Q_{\text{гсл}}$  - энергия в «горячем» слое подложки,  $Q_{\text{ост}}$  - остаточная энергия, передаваемая в объем подложки.

Преобразуем уравнение (2) к виду, удобному для расчета

$$(m_{\text{ч}} \cdot v^2) / 2 + C_{\text{ч}} \cdot m_{\text{ч}} (T_{\text{пл}} - T_0) + L \cdot m_{\text{ч}} = C_{\text{ч}} \cdot m_{\text{ч}} (T_{\text{срч}} - T_0) + m_{\text{гсл}} C_n (T_{\text{сргсл}} - T_0) + m_{\text{ост}} C_n (T_{\text{срост}} - T_0) \tag{2a}$$

где  $m_{\text{ч}}$ ,  $m_{\text{гсл}}$ ,  $m_{\text{ост}}$ ,  $T_{\text{срч}}$ ,  $T_{\text{сргсл}}$ ,  $T_{\text{срост}}$  – массы и средние температуры частицы (сплета), горячего слоя и остального объема подложки соответственно.

**Материалы основы и покрытия, условия напыления.** В качестве модельных материалов при проведении численных расчетов были выбраны для подложки – железо, для напыляемой частицы – никель, вольфрам и алюминий. Теплофизические характеристики материалов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Теплофизические характеристики материалов.

Материал	$T_n, K$	$\rho_0, \text{кг/м}^3$	$C, \text{Дж/кг}\cdot\text{K}$	$L, \text{Дж/кг}\cdot 10^3$
Fe	1810	7870	432,9	276
W	3693	19300	269	185
Ni	1728	8900	364	305
Al	933	2702	903	393

Расчет проводили для следующих условий: диаметр частицы  $D=0,1\cdot 10^{-3}$  м; скорость  $v = 100$  м/с; температура подложки  $T_0 = 300$  К; температура частицы  $T_u = T_{\text{пл}}$ .

Распределение температуры в подложке в момент полной кристаллизации частицы для определения толщины «горячего» слоя при заданном  $\Delta T = 30^0$  получено с помощью компьютерной программы CRISTALL [3,4].

**Результаты расчетов.** Необходимые для расчетов по формуле (2a) данные для выбранных материалов и заданных условий напыления представлены в таблице 2.

Таблица 2. Характеристики системы частица-подложка при формировании сплета.

Материал	$S, \text{ м}^2 \cdot 10^{-18}$	$h_{\text{ссл}}, \text{ м} \cdot 10^{-7}$	$m_{\text{ч}}, \text{ кг} \cdot 10^{-9}$	$m_{\text{ссл}}, \text{ кг} \cdot 10^{-15}$	$m_{\text{ост}}, \text{ кг} \cdot 10^{-10}$	$T_{\text{срч}}, \text{ К}$	$T_{\text{ср ссл}}, \text{ К}$	$T_{\text{ср ост}}, \text{ К}$
W	1,99	2,19	10,1	1,35	3,53	3246	2784	1534
Ni	1,72	3,1	4,6	1,92	4,53	1561	1379	832
Al	0,11	5,27	1,4	3,26	7,72	879	811	548

При получении этих данных принимали, что частица после деформации затвердевании принимает форму цилиндра (сплет) высотой  $h$  и диаметром  $D$ ,  $S$  – площадь контакта сплета с подложкой. Тепловой поток нормален к поверхности, объем «горячего» и нагретого слоя определяется контактной площадью  $S$  и соответствующей глубиной прогрева подложки  $h_{\text{ссл}}$ . Результаты расчета составляющих теплового баланса (2) представлены в таблице 3.

Таблица 3. Распределение энергии в системе частица-подложка при кристаллизации сплета.

Материал	$W_{\text{к}}, \text{ Дж} \cdot 10^{-5}$	$Q_{\text{T}}, \text{ Дж} \cdot 10^{-3}$	$Q_{\text{L}}, \text{ Дж} \cdot 10^{-3}$	$Q_{\text{ч}}, \text{ Дж} \cdot 10^{-3}$	$Q_{\text{ссл}}, \text{ Дж} \cdot 10^{-10}$	$Q_{\text{ост}}, \text{ Дж} \cdot 10^{-3}$
W	5,05	9,21	1,86	5,42	9,14	5,72
Ni	2,33	2,42	1,42	2,14	7,74	1,73
Al	0,71	0,81	0,56	0,74	0,59	0,63

Сравнительный анализ полученных данных показывает, что при выбранной скорости  $v=100$  м/с состояние частицы перед столкновением с подложкой определяется в основном тепловой энергией  $Q_{\text{T}}$ , величина которой зависит от температуры плавления материала частицы. В ряду *W, Ni, Al* эта составляющая энергии частиц возрастает в  $\approx 10$  раз. Доля кинетической энергии частиц рассматриваемых материалов составляет 0,45% (W), 0,52% (Ni), 3,38% (Al) 3,38 % от начальной энергии частицы.

Распределение энергии в системе частица-подложка к моменту затвердевания частицы (максимальный прогрев подложки) показывает, что основная доля энергии распределяется между сплетом и общим объемом нагретой части подложки. На долю «горячего» слоя, ответственного за образование адгезионной связи покрытия с основой, приходится для исследуемых материалов лишь малая доля от общей энергии.

На основании полученных данных можно определить эффективность процесса напыления  $\mathcal{E}$  для выбранных материалов и заданных условий напыления, результаты представлены в таблице 4.

$$\mathcal{E} = ((W_{\text{к}} + Q_{\text{Tч}} + Q_{\text{L}}) / Q_{\text{ссл}}), \quad (3)$$

Таблица 4. Энергетическая характеристика процессов напыления для разных материалов.

Материал	$W_{\text{к}} + Q_{\text{Tч}} + Q_{\text{L}}, \text{ Дж} \cdot 10^{-3}$	$Q_{\text{ссл}}, \text{ Дж} \cdot 10^{-10}$	$\mathcal{E}, 10^{-7}$
W	11,14	9,15	1,22
Ni	3,87	7,74	0,49
Al	1,36	0,59	2,26

Как показали проведенные расчеты, эффективность процесса напыления, т.е. доля энергии, которая обеспечивает формирование адгезионных связей на контактной границе, оказывается чрезвычайно мала. Это связано с большими потерями энергии на сопутствующие процессы: нагрев газа, оборудования, потери на излучение и др.

Для повышения качества газотермических покрытий (увеличения адгезии) в настоящее время широко используются различные способы ввода дополнительной энергии в поверхностный «горячий» слой подложки (энергетическая активация) – дробеструйная обработка, предварительный подогрев напыляемой поверхности, увеличение скорости напыляемых частиц, использование экзотермических порошков и др.

### **Список литературы:**

1. Борисов Ю.С., Борисова А.Л. Плазменные порошковые покрытия. – К.: Техника, 1986. – 204 с.
2. Кудинов В.В., Бобров Г.В. Нанесение покрытий напыления. Теория, технология и оборудование. Учебник для вузов. – М.: Металлургия, 1992. – 432 с.
3. Митюшова Ю.А., Зенин Б.С. Сравнительный анализ адгезионных и когезионных связей газотермических покрытий. Труды XI Всероссийской школы-семинара с международным участием. Томск. НИ ТПУ. – 2011. С. 137–142.
4. Храпковская Ю.А., Зенин Б.С. Энергетическая активация атомов подложки при формировании газотермического покрытия // Современные материалы, техника и технологии в машиностроении: Сборник материалов международной конференции. – 2014. – Т. 1. – С. 22–25.