

трения с контртелом SiC (рисунок 4) покрытие  $Al_2O_3$ -70%вес. $Mo_2N$  имеет более гладкую поверхность по сравнению с покрытием с 30%мас. $Mo_2N$ , у которого происходит частичное вырывание отдельных частей покрытия и отмечены явно выраженные признаки схватывания в результате фрикционного взаимодействия.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, в процессе плазменного напыления формируются композиционные покрытия системы  $Al_2O_3$  –  $Mo_2N$  на основе молибденовой связи и сложных оксидов основных легирующих элементов. Эксперимент показал, что исследуемые в работе составы покрытий с повышением температуры испытаний показывают снижение значений коэффициента трения и удельного износа. Гораздо лучшие трибологические показатели имеют покрытия  $Al_2O_3$ -70% масс  $Mo_2N$ , у которых при повышении температуры испытания до 600°C при условиях благоприятной приработки обеспечивается снижение коэффициента трения с 0,5fтр (при 25°C) до 0,38 fтр, что, очевидно, обусловлено образованием фаз оксида молибдена, выполняющих роль высокотемпературных твердых смазок в условиях нагрева.

#### Список литературы

1. Гальченко Н.К., Самарцев В.П. Белюк С.И., Гальченко В.Г. Особенности формирования структуры и свойства металлокерамических покрытий, полученных нитридо-плазменной технологией // Проблемы черной металлургии и материаловедения, -№1.-2010.-С. 60-64.
2. Buck V. Morphological properties of sputtered  $Mo_2S$  films // Wear . – 1983- V.191. –Р. 81-88
3. S.M. Aouadi, Y.Paudel, W.J. Simonson, Q. Ge, P. Kohli, C. Muratore, A.A. Voevodin, Tribological investigation of adaptive  $Mo_2N/Mo_2S/Ag$  coatings with high sulfur content// Surface and Coatings Technology. -2009 –Vol. 203.-P. 1304-1309.

### ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ГАЗОТЕРМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ НА ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ОТНОСИТЕЛЬНУЮ АДГЕЗИЮ

*Ю.А. УЛЫБИНА, Б.С. ЗЕНИН*

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

E-mail: [yau@tpu.ru](mailto:yau@tpu.ru)

### ASSESSMENT OF PROCESS THERMAL SPRAYING ON FACTORS DETERMINED BY THE RELATIVE ADHESION

*Y.A. ULYBINA, B.S. ZENIN*  
Tomsk Polytechnic University

E-mail: [yau@tpu.ru](mailto:yau@tpu.ru)

**Abstract.** In this paper we studied the features of the energy balance in the system particles - substrate during thermal spraying covering. The activation energy of the atoms in the hot surface layer of the substrate was estimated. The effect of particle velocity on the activation energy of the atoms of the substrate was investigated. It is shown that in the framework of selected models of activation energy of the atoms of the substrate depends on the deposition process parameters.

**Введение.** Одним из способов решения проблем, связанных с защитой изделий от воздействия агрессивной окружающей среды, повышением износостойкости элементов конструкций может быть нанесение специальных покрытий на поверхность изделий газотермическими методами напыления.

Анализ литературных данных [5] показал, что в последние годы появились и получают свое развитие новые способы газотермического напыления: сверхзвуковое газопламенное напыление, сверхзвуковое плазменное напыление, сверхзвуковое газодинамическое напыление. Таким образом, можно отметить мировую тенденцию, что повышение адгезии покрытий можно обеспечить за счет увеличения скорости напыляемых частиц.

В работе [1] показано, что относительная адгезия зависит от энергии активации атомов в подложке  $E_a$ :

$$\frac{N(\tau)}{N_0} = 1 - \exp \left[ - \frac{v\tau}{\exp\left(\frac{E_a}{kT_k}\right)} \right] \quad (1)$$

где  $N_0$  – количество атомов на поверхности основы находящихся в физическом контакте;  $N(\tau)$  – количество атомов из числа  $N_0$ , прореагировавших за время  $\tau$ ;  $v$  – частота собственных колебаний атомов,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T_k$  – температура в контакте на границе покрытие-подложка.

**Целью работы** являлось рассмотрение зависимости энергетических условий взаимодействия напыляемой частицы с подложкой от технологических параметров процесса газотермического напыления.

**Материалы и методика исследования.** В работе [3] для расчета баланса энергии в системе «частица-основа» была использована модель, в которой температура частицы в момент столкновения с основой и температура в контакте на границе частица-основа не зависели от скорости частицы. В результате, был сделан парадоксальный вывод, что энергия активации атомов в «горячем» слое основы (один из параметров получения высокой адгезии) не зависит от скорости частицы.

Настоящая модель, рассматриваемая в рамках данной работа, направлена на дополнение и уточнение модели [3]. Вводится критерий, учитывающий роль скорости частицы на нагрев порошка. Этим критерием служит: температура дополнительного нагрева частицы при ударе  $\Delta T$  [4]

$$\Delta T = \frac{v^2}{c_{\text{ч}}} - \frac{3\sigma \left[ \frac{2r_{\text{ч}}}{3x_0} + \sqrt{\frac{x_0}{3r_{\text{ч}}}} - 1 \right]}{c_{\text{ч}} \rho r_{\text{ч}}},$$

где  $\rho$  – плотность материала покрытия;  $r_{\text{ч}}$  – радиус частицы;  $x_0$  – толщина сплэта.

В работе [2] представлена модель взаимодействия частицы с подложкой, в которой выделялся приповерхностный «горячий» слой, определяющий степень активации атомов в подложке ( $E_a$ ).

Учитывая [2,3,4], настоящая модель предполагает, что напыляемая частица, диаметром  $d_{\text{ч}}$ , имеющая в момент столкновения результирующую температуру  $T_{\text{рез}} = (W_{\text{к}}/m_{\text{ч}} * c_{\text{ч}}) + T_{\text{пл}}$ , при встрече с подложкой деформируется, образуя плоский тонкий диск - сплэт, цилиндрической формы (рисунок 1). Температура в контакте ( $T_k$ ) при ударе частицы о подложку изменяется, в зависимости от скорости частицы.

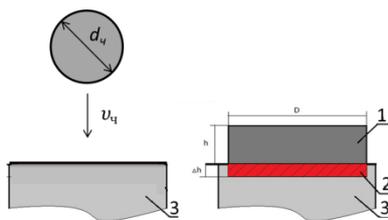


Рисунок 1 – Схема формирования сплэта: 1 – сплэт; 2 – «горячий» слой; 3 – подложка;  $d_p$  – диаметр частицы;  $v_p$  – скорость частицы

В соответствии с законом сохранения энергии запишем уравнение баланса энергии в системе «частица-подложка» для нашей модели до и после столкновения:

$$Q'_m + Q_L = Q_p + Q_{гсл} + Q_{об} \quad (2)$$

где  $Q'_m$  – энергия частицы с учетом вклада кинетической энергии  $W_k$  ( $W_k = mv_p^2/2$ );  $Q_L$  – скрытая теплота кристаллизации;  $Q_p$  – тепловая энергия, сохраняемая в частице к моменту полной кристаллизации;  $Q_{гсл}$  – энергия в «горячем» слое подложки;  $Q_{об}$  – энергия, передаваемая в объем подложки.

В работе проведена оценка распределения энергии в системе «частица-подложка» до и после столкновения, в соответствие с уравнением (2) при разных скоростях для модельных материалов: подложка – Fe, напыляемые частицы – Ni.

Распределение температуры по глубине подложки, необходимой для определения толщины «горячего слоя» строится на основании данных, полученных с помощью программного комплекса «CRISTALL». Программа позволяет определить толщину частицы после удара о подложку (толщина сплэта  $x_0$ ), время полной кристаллизации.

Расчет температурных условий взаимодействия частицы с подложкой проводили для следующих условий: диаметр частицы  $d_p = 0,1 \cdot 10^{-3}$  м; температура подложки  $T_0 = 300$  К; толщина «горячего» слоя определялась при заданном условии  $\Delta T = 30^\circ\text{C}$ ; скорость частицы варьировалась в пределах  $v_p = 100$ -1000 м/с;

**Результаты моделирования и их обсуждение.** Результаты расчета распределения энергии в системе «частица-подложка» представлены в таблице 2. Количественная оценка составляющих  $Q_i$  проведена по аналогии [2].

Таблица 2 - Составляющие теплового баланса в системе «частица-подложка»

$v_p$ м/с	$\Delta T$ , К	$Q'_m$ , Дж	$Q_L$ , Дж	$Q_p$ , Дж	$Q_{гсл}$ , Дж	$Q_{ост}$ , Дж
100	13,39	2,44E-03	1,40E-03	2,14E-03	6,67E-05	1,64E-03
200	54,45	2,51E-03	1,40E-03	2,17E-03	6,75E-05	1,67E-03
300	123,02	2,63E-03	1,40E-03	2,23E-03	7,06E-05	1,73E-03
400	219,08	2,79E-03	1,40E-03	2,31E-03	8,04E-05	1,80E-03
500	342,61	3,00E-03	1,40E-03	2,42E-03	8,78E-05	1,90E-03
600	493,63	3,26E-03	1,40E-03	2,55E-03	9,34E-05	2,02E-03
700	672,13	3,56E-03	1,40E-03	2,70E-03	1,08E-04	2,16E-03
800	878,11	3,91E-03	1,40E-03	2,87E-03	1,14E-04	2,33E-03
900	1111,57	4,31E-03	1,40E-03	3,07E-03	1,27E-04	2,51E-03
1000	1372,50	4,75E-03	1,40E-03	3,29E-03	1,35E-04	2,73E-03

Анализ полученных данных показывает, что общая энергии системы «частица-подложка» до соударения, а также суммарная энергия после соударения в си-

стеме «сплэт-подложка» и энергия отдельных частей системы растут с увеличением скорости частицы. Рассмотрим подробнее, как распределяется энергия в системе после столкновения. Построим гистограмму зависимости составляющих энергии в системе «частица-подложка» после взаимодействия частицы с основой от ее скорости (рисунок 2).

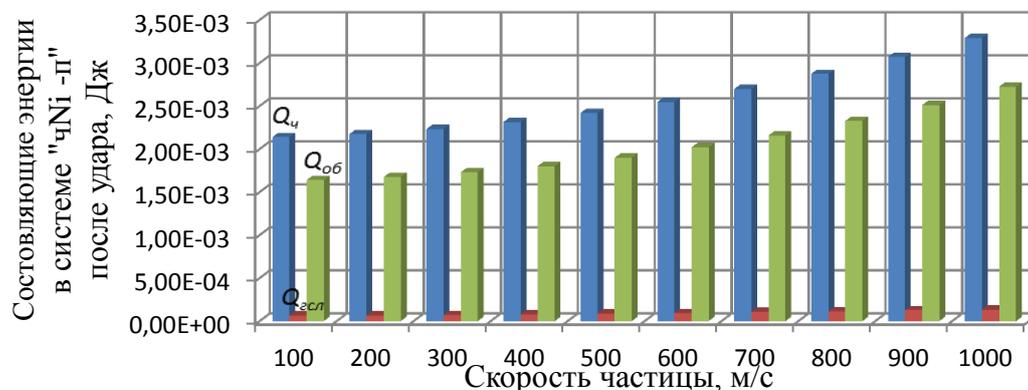


Рисунок 2 - Гистограмма зависимости составляющих энергии частицы никеля, после взаимодействия с подложкой от скорости частицы

Из гистограммы видно, что большая часть энергии сохраняется в частице к моменту полной кристаллизации  $Q_{ч}$ . В дальнейшем, для оценки относительной адгезии частицы на основе, нас будет интересовать только тепловая энергия в «горячем» слое, которая определяет прочность связи на границе «покрытие-основа». При изменении скорости частицы от 100 до 1000 м/с энергия в горячем слое подложки  $Q_{сл}$  возрастает примерно в два раза.

Для оценки влияния скорости частицы на условия, определяющие относительную адгезию, построим их зависимости от скорости частицы (рисунок 3).

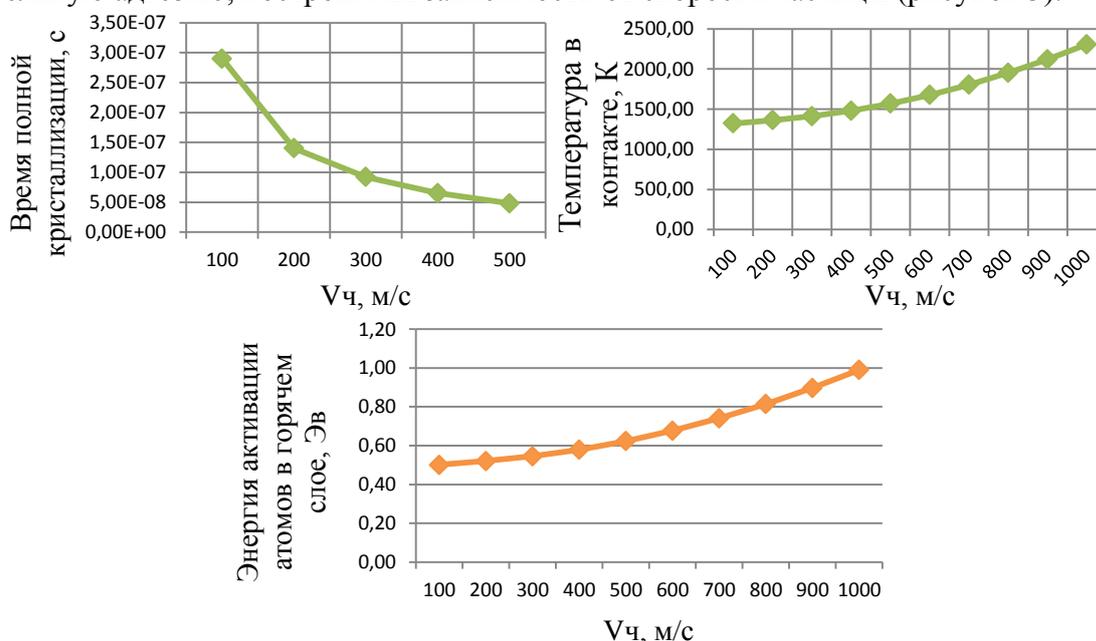


Рисунок 3 – Влияние скорости частицы на параметры взаимодействия частиц с подложкой

Энергия «горячего» слоя с увеличением скорости возрастает, а значит, энергия активации отдельных атомов «горячего» слоя зависит от скорости частицы. Температура в контакте с увеличением скорости частицы возрастает, это объясняется увеличением температуры частицы, за счет учета дополнительного нагрева частицы при ударе. Заметим, что время кристаллизации частицы уменьшается с увеличением ее скорости. Это явление обусловлено, уменьшением толщины сплэта с возрастанием скорости частицы.

**Выводы.** Полученные зависимости параметров, определяющих величину относительной адгезии, от скорости частицы не позволяют однозначно оценить характер влияния скорости на адгезию частицы. Для этого необходимо рассмотреть, какой из факторов (температура в контакте или время полной кристаллизации) вносит решающий вклад в величину относительной адгезии.

#### **Список литературы**

1. Кудинов В.В., Пешков П.Ю., Балашенко В.Е.. Нанесение покрытий плазмой – М.:Наука,1990.- 408с.
2. Храпковская Ю.А., Зенин Б.С. Активация атомов подложки при взаимодействии напыленных частиц с основой в газотермическом покрытии. //XXI Международная научная конференция студентов и молодых учёных СТТ-2015. – с.
3. Улыбина Ю.А. Зенин Б.С., Храпковская Ю.А. Оценка влияния скорости частицы при газотермическом напылении на энергию активации атомов в поверхностном слое подложки. ВСЕРОССИЙСКАЯ ШКОЛА-СЕМИНАР с международным участием. Современное материаловедение: материалы и технологии новых поколений 2015, с. 160-164
4. Газотермическое напыление композиционных порошков. / Ю.С. Борисов, А.Я.Кулик, А.С.Мнухин - Л.: Машиностроение, 1985. - 199 с.
5. Кузнецов Ю.А. Перспективные способы высокоскоростного газотермического напыления покрытий. // Материалы 8-й Междунар. практ. конф. "Новые материалы и технологии в машиностроении". 2011.

### **ГРАНИЧНЫЕ ТЕМПЕРАТУРНЫЕ УСЛОВИЯ ПОЛУЧЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ ГАЗОТЕРМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ**

*ЧЭНЬ МИНШУ, Б.С. ЗЕНИН*

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

E-mail: t13940132979@gmail.com

### **BOUNDARY TEMPERATURE CONDITIONS AT PRODUCING MULTILAYER COATINGS BY THERMAL SPRAYING**

*CHEN MINGSHU, B.S. ZENIN*

Tomsk Polytechnic University

E-mail: t13940132979@gmail.com

*Abstract. In this article we examined the temperature conditions in contact sputtered particle - substrate at the formation of a multi-layer thermal spray coating. The calculations of contact temperature at the interface sputtered particle - substrate for various combinations of the contacting materials were carried.*