

УДК 621.165.620.193

А.Э. КОВАЛЬСКИЙ

*Институт проблем машиностроения НАН Украины им. А.Н. Подгорного, Украина*

## МЕТОД РАСЧЕТА ПРОЧНОСТИ СЦЕПЛЕНИЯ С ПОВЕРХНОСТЬЮ ПОДЛОЖКИ ИЗ ЛОПАТОЧНОГО МАТЕРИАЛА ЧАСТИЦ ПЛАЗМЕННОГО СВЧ-ПОГЛОЩАЮЩЕГО ПОКРЫТИЯ ИЗ КЕРМЕТА

Предложен метод расчета прочности соединения с подложкой из лопаточного материала частиц плазменного СВЧ-поглощающего покрытия из кермета в новом способе активной защиты рабочих лопаток влажно-паровых турбин от эрозии. Метод расчета базируется на разработанных математических моделях нестационарного процесса ударного взаимодействия напыляемых плазмой частиц покрытия с подложкой и процесса формирования связей между частицей и подложкой. Обоснованность метода подтверждается сравнением полученных результатов с опубликованными теоретическими и экспериментальными данными.

**плазменное напыление, керметное покрытие, противоэрозионная защита, прочность сцепления**

### Введение

Реализация активного способа защиты рабочих лопаток последних ступеней энергетических турбин от эрозии с помощью СВЧ ЭМП [1] предполагает размещение на вогнутой поверхности сопловых лопаток в периферийной зоне нагревательного элемента с плазменно-напыленным СВЧ-поглощающим покрытием из кермета.

Основными контролируемыми параметрами процесса нанесения плазмой различных покрытий являются температура и давление в области контакта жидких частиц материала напыляемого покрытия с твердой поверхностью подложки.

Известные математические модели [2 – 4] неудовлетворительно описывают сложный нестационарный процесс ударного взаимодействия капель, заключающихся в своем объеме расплав материала плазменного покрытия, с твердой подложкой, в результате которого в контактной области должны обеспечиваться соответствующие параметры (давление, температура) технологического процесса напыления покрытия.

### 1. Формулирование проблемы

Плазменное покрытие образуется в результате высокоскоростного удара, сильной деформации и

затвердевания на твердой поверхности подложки капель расплава материала покрытия, которые формируются и разгоняются в потоке плазмы до определенных скоростей нормального удара по поверхности подложки. При этом диаметр жидких частиц, напыляемых плазмой на подложку, обычно находится в диапазоне значений:  $20 \div 200$  мкм.

Экспериментальным путем было установлено [3, 4], что для создания прочного плазменного покрытия на металлической подложке требуется обеспечить скорость нормального удара по ее поверхности капель расплава материала покрытия в диапазоне значений  $100 \div 300$  м/с.

Указанный диапазон скоростей нормального удара, а также диапазон размеров жидких частиц покрытия, наносимых плазмой на подложку из лопаточного материала, соответствует диапазону параметров удара эрозионно-опасных капель влаги, попадающих на входные кромки рабочих лопаток последних ступеней энергетических турбин.

В работе [4] отмечается, что физические процессы, связанные с высокоскоростным ударом и растеканием капли воды по поверхности твердой преграды, развиваются на основе закономерностей, которые в полной мере можно отнести и к процессам,

связанным с ударом и растеканием по твердой подложке капли расплава материала плазменного покрытия (жидкие частицы металлов, оксидов).

Это означает, что может принята следующая гипотеза. Теоретические результаты, полученные в работе [5] для высокоскоростного удара по поверхности подложки из лопаточного материала (20X13) сферической капли воды, можно отнести к высокоскоростному удару сферической капли расплава оксида алюминия и металла (никеля), которые используются при создании плазменного СВЧ-поглощающего керметного покрытия.

Кроме того, примем обоснованную В.В. Кудиновым в работе [3] гипотезу о том, что даже при максимальной производительности напыления каждая капля расплава материала плазменного покрытия взаимодействует с твердой подложкой индивидуально.

## 2. Решение проблемы

**2.1. Математическая модель физико-химического процесса соединения жидкой сферической частицы плазменного СВЧ-поглощающего керметного покрытия с поверхностью подложки из лопаточного материала.** Гипотеза о независимости поведения жидких частиц керметного покрытия, напыляемых плазмой, на поверхности подложки из лопаточного материала (20X13) существенно упрощает задачу построения математической модели физико-химического процесса приваривания, который развивается на пятне контакта частицы с подложкой.

В такой постановке задача сводится к разработке математической модели нестационарного физико-химического процесса соединения частицы керметного покрытия с подложкой из лопаточного материала при плазменном напылении, который развивается в зоне контакта изолированной жидкой сферической частицы (оксида алюминия, никеля) с поверхностью стальной подложки вследствие высокоскоростного удара, растекания и затвердевания частицы.

**2.1.1. Математическая модель нестационарного процесса ударного взаимодействия жидкой частицы плазменного керметного покрытия с подложкой из лопаточного материала.** Экспериментальные исследования [2 – 4] закономерностей приваривания отдельных частиц плазменного покрытия к полированной металлической подложке позволили установить ряд важных физических закономерностей данного процесса.

Однако, достаточного внимания исследованию весьма сложного пространственно-временного закона распределения давления, которое возникает в зоне контакта жидкой частицы покрытия, напыляемого плазмой, с твердой поверхностью подложки при высокоскоростном соударении не уделялось.

Вместе с тем, хорошо известно, что контактные условия взаимодействия жидкой частицы с твердой подложкой в значительной мере определяют прочность ее сцепления с подложкой, а значит - прочность получаемого плазменного покрытия.

На первом этапе создания математической модели нестационарного физико-химического процесса соединения сферической капли расплава материала плазменного покрытия с твердой поверхностью подложки из лопаточного материала должна быть разработана физически обоснованная математическая модель нестационарного гидродинамического процесса, который протекает в этой капле при ее соударении с подложкой.

Достаточно физически обоснованная математическая модель высокоскоростного удара сферической капли жидкости (воды) по плоской твердой поверхности подложки в диапазоне нормальных скоростей удара  $V_0 = 150 \div 350$  м/с была предложена в работе [5].

Принимая во внимание близость гидродинамических процессов, развивающихся в сферической капле воды и капле расплава компонентов плазменного керметного покрытия при высокоскоростном ударе о плоскую твердую преграду, будем предполагать следующее.

Нестационарное давление на расширяющемся пятне контакта жидкой сферической частицы компонентов керметного покрытия (оксида алюминия, никеля), нанесенной плазмой на подложку из лопаточного материала, можно определить по формуле, полученной для случая высокоскоростного удара сферической капли влаги по рабочей лопатке последней ступени мощной паровой турбины [5]:

$$p(r) = -A_i \times \rho_{жс} \times \sum_{n=1}^N \left( \frac{-2V_0 L J_0 \left( \frac{r \cdot \mu_n}{L} \right) \cdot \left( 1 - \left( e^{(-H\mu_n/L)} \right)^2 \right)}{\mu_n^2 \cdot J_1(\mu_n) \cdot \left( 1 + \left( e^{(-H\mu_n/L)} \right)^2 \right)} \right), \quad (1)$$

где  $A_i$  – коэффициенты, определяемые по методу [6];

$\rho_{жс}$  – плотность жидкости в капле;

$H$  – высота эквивалентной цилиндрической капли, которая на каждом шаге по времени ударного взаимодействия заменяет сферическую каплю;

$J_0 \left( \mu_n \frac{r}{L} \right)$  – функция Бесселя нулевого порядка;

$\mu_n$  – корни уравнения  $J_0(\mu) = 0$ ;

$J_1(\mu_n)$  – функция Бесселя первого порядка;

$n = 1, 2, 3, \dots$

Параметры течения в сферической капле жидкости при ударе о стальную подложку можно принять постоянными в пределах малых фиксированных интервалов времени, границы которых определяются по формуле [6]:

$$t_i = \frac{1}{2} t_0 + \frac{\lambda_R}{C_R} i + \sqrt{\left( \frac{1}{2} t_0 \right)^2 + t_0 \frac{\lambda_R}{C_R} i}, \quad (2)$$

где  $t_0 = 2 \cdot r_k \cdot V_0 / C_R^2$ ;

$r_k$  – радиус капли;

$V_0$  – скорость ее нормального удара по поверхности стальной подложки;

$C_R$  – скорость распространения волны Рэлея в материале подложки;

$\lambda_R$  – длина волны Рэлея;

$i = 1, 2, 3, \dots$

При ударе жидкой частицы напыляемого покрытия сферической формы по твердой поверхности подложки текущий радиус пятна контакта в процессе деформирования частицы можно определить по формуле [7]:

$$L = \sqrt{2 \cdot r_k \cdot V_0 \cdot t} \quad (3)$$

где  $t$  – текущее время ударного взаимодействия частицы с подложкой.

На рис. 1 показаны профили сечений ( $\varphi = const$ ) пространственных осесимметричных эпюр ударного давления на пятне контакта сферической капли расплава оксида алюминия с подложкой из материала 20X13, полученные расчетным путем по формулам (1) – (3) для различных интервалов времени ударного взаимодействия.

Эпюры давления получены для следующих условий:

– радиус капли  $r_k = 0,00005$  м;

– плотность жидкости, содержащейся в капле

$\rho_{жс} = 3810$  кг/м<sup>3</sup>;

– скорость удара  $V_0 = 300$  м/с;

– плотность материала рабочей лопатки (20X13)

$\rho_m = 7800$  кг/м<sup>3</sup>;

– коэффициент Пуассона и модуль продольной упругости для стали 20X13  $\nu = 0,3$ ;

–  $E = 2,18 \cdot 10^{11}$  Н/м<sup>2</sup>;

– модуль сдвига:  $G = 8,38 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>.

Расчетное давление от удара капли нормировалось по давлению гидравлического удара  $p^*$ , которое определялось в соответствии с одномерной теорией [8]. Время ударного взаимодействия, когда на пятне контакта существует достаточно большое положительное давление от удара жидкой частицы керметного покрытия (оксида алюминия, никеля) определяется формулой [6]:

$$t_k = r_k / V_0, \quad (4)$$

Формула (4) корреспондирует зависимости, которая была предложена в работе [3].

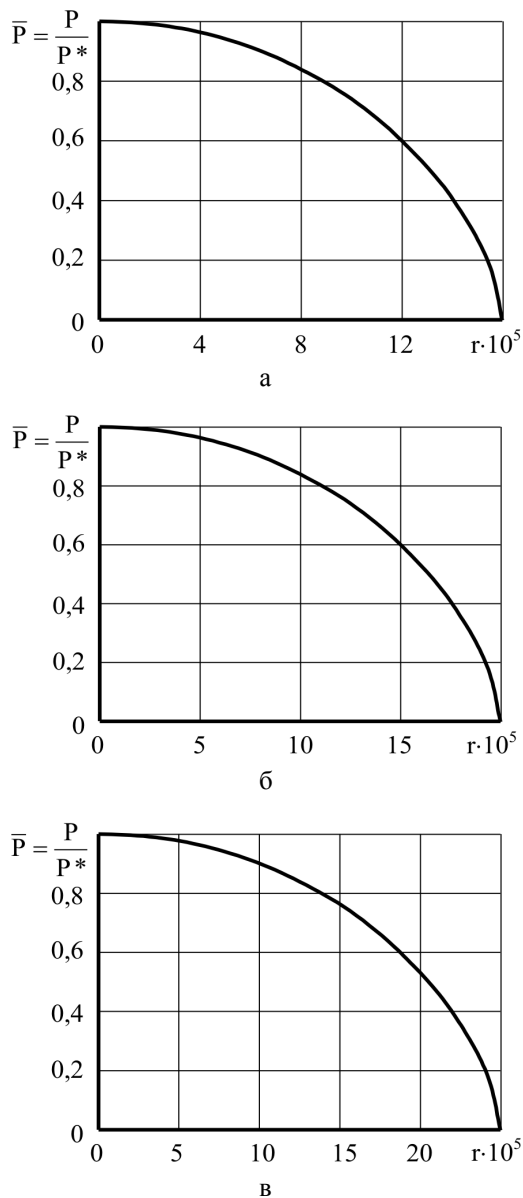


Рис. 1. Эпюры нестационарного давления, возникающего на пятне контакта сферической капли расплава оксида алюминия при высокоскоростном ударе по стальной (20Х13) подложке при напылении плазмой в различные моменты времени ударного взаимодействия:

$$а - t_0 < t \leq t_1$$

$$(t_0 = 0,3248 \cdot 10^{-7} c, t_1 = 0,8752 \cdot 10^{-7} c);$$

$$б - t_1 < t \leq t_2 (t_2 = 0,1345 \cdot 10^{-6} c);$$

$$в - t_4 < t \leq t_5$$

$$(t_4 = 0,2217 \cdot 10^{-6} c, t_5 = 0,26367 \cdot 10^{-6} c)$$

По окончанию времени  $t_k$  давление в контактной области мгновенно снижается до нуля вследствие сильного деформирования и растекания капли расплава материала покрытия по подложке.

Радиальная скорость течения на пятне контакта сферической капли расплава материала напыляемого плазмой керметного покрытия вследствие высокоскоростного удара по жесткой плоской поверхности подложки из лопаточного материала определяется зависимостью [5]:

$$u(r, z) = \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{2V_0 J_1\left(\frac{r\mu_n}{L}\right) \left(1 - \left(e^{-H\mu_n/L}\right)^2\right)}{\mu_n \cdot J_1(\mu_n) \cdot \left(1 + \left(e^{-H\mu_n/L}\right)^2\right)} \right) \quad (5)$$

На рис. 2 представлены результаты расчета относительной радиальной скорости течения жидкости  $u/V_0$  на пятне контакта капли вследствие удара по жесткой плоской поверхности преграды при изменении относительной радиальной координаты  $r/L$ , отсчитанной от центра удара капли.

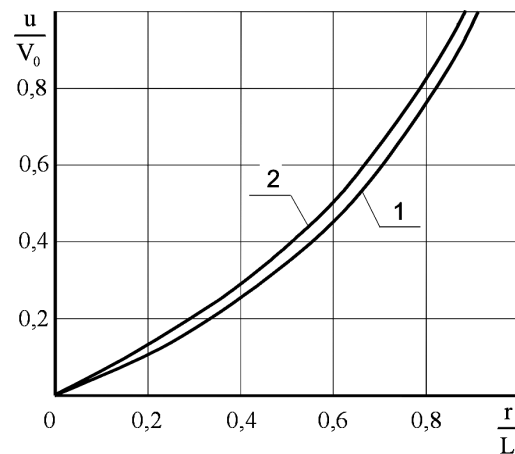


Рис. 2. Радиальная скорость течения жидкости (расплав оксида алюминия) в капле на пятне контакта при высокоскоростном ударе о жесткую преграду из материала 20Х13

На рис. 2: кривая 1 – расчетные значения относительной радиальной скорости течения жидкости на пятне контакта, полученной по аналитической модели удара сферической капли, предложенной М.И. Хмельником [9]; кривая 2 – расчетные значения той же скорости, полученные по формуле (5).

Как можно заметить, полученные результаты расчета достаточно хорошо совпадают как в качественном, так и в количественном смысле в пределах всей контактной области, исключая ее границу.

Заметим, что на границе пятна контакта капли с преградой (в зоне, представляющей наибольший интерес) модель Хмельника [9] для определения скорости радиального растекания жидкости использовать нельзя, поскольку она приводит к результату, противоречащему физическому смыслу (при  $(r/L) \rightarrow 1$  относительная скорость растекания  $(u/V_0) \rightarrow \infty$ ).

Представленная выше математическая модель такой особенности не имеет и дает на границе пятна контакта конечное значение скорости радиального растекания жидкости, соответствующее экспериментальным данным [7].

**2.1.2. Математическая модель кинетического процесса формирования связей между сферической частицей плазменного покрытия из кермета и стальной подложкой.** Весь процесс взаимодействия материалов при создании плазменных покрытий складывается из трех стадий:

а) на первой стадии возникает физический контакт материала частицы с материалом подложки; эта стадия завершается подготовкой поверхности подложки к взаимодействию с частицей напыляемого покрытия;

б) на второй стадии (стадии химического взаимодействия) происходит активация поверхностей, находящихся в физическом контакте, в результате чего развивается процесс химического взаимодействия между атомами частицы и подложки на поверхности раздела реагирующих фаз; эта стадия завершается прочным соединением частицы с подложкой;

в) на третьей стадии развиваются процессы объемного взаимодействия находящихся в контакте материалов.

Процесс объемного взаимодействия жидкой частицы материала плазменного покрытия (оксида алюминия, никеля) с подложкой в данной работе не рассматривается.

В настоящей работе рассматриваются только механические процессы, сопровождающие присоединение жидкой частицы покрытия к подложке.

Кроме действующего в контактной области давления необходимые условия химического взаимодействия между атомами частицы и подложки обеспечиваются также за счет высокой скорости радиального растекания капли расплава материала покрытия по твердой поверхности подложки. В результате этого создаются более благоприятные условия для установления химических связей между атомами частицы и подложки, что позволяет обеспечить достаточно прочное соединение частицы покрытия с подложкой. Скорость радиального течения в сферической капле расплава компонентов СВЧ-поглощающего керметного покрытия, напыляемого плазмой на подложку из лопаточного материала, можно определить по формуле (5).

Прочность соединения напыляемого плазмой покрытия с подложкой определяется, в основном, полнотой химического взаимодействия, устанавливающегося в контактной области между частицей покрытия и подложкой. Внешним проявлением такого взаимодействия является заполнение зоны контакта частицы с подложкой очагами схватывания.

Физический контакт между атомами частицы покрытия, наносимого плазмой, и подложки, характеризуется тем, что значительная часть возбужденных атомов частицы покрытия, находящихся в контакте с атомами подложки, оказывается подготовленной к химическому взаимодействию с атомами подложки.

Если атомам подложки сообщить энергию активации, то они смогут образовать химические связи с атомами частицы.

Принимая данное условие, В.В. Кудинов предложил математическую модель процесса активации атомов подложки в виде [2 – 4]:

$$\frac{dN(t)}{dt} = [N_k - N(t)] \cdot v \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{kT_k}\right), \quad (6)$$

где  $N_k$  – количество атомов на поверхности подложки (частицы), которые находятся в физическом контакте;

$N(t)$  – количество атомов из числа атомов  $N_K$ ,  
которые прореагировали за время  $t$ ;

$\nu$  – частота собственных колебаний атомов подложки (постоянная процесса активации);

$E_a$  – энергия активации;

$T_K$  – абсолютная температура контакта;

$k$  – постоянная Больцмана.

Следует отметить, что в процессе деформирования частицы покрытия, величина пятна контакта, на котором реализуются условия физического контакта, позволяющие обеспечить возникновение химических связей между атомами, изменяется.

При этом для каждого фиксированного момента времени  $t_i$ , который определяется формулой (2), можно определить общее количество прореагировавших атомов поверхности подложки  $N(t_i)$ .

Такой подход к проблеме физико-химического взаимодействия жидких частиц плазменного керметного покрытия со стальной подложкой позволяет построить нестационарную математическую модель кинетики физико-химического взаимодействия рассматриваемых материалов, которая будет учитывать нестационарность гидродинамического процесса в жидкой частице покрытия при высокоскоростном ударе по поверхности твердой подложки.

Принимая гипотезу В.В. Кудинова [4] о том, что абсолютная температура на пятне контакта  $T_K = \text{const}$ , из уравнение (6) получим следующее:

$$\int_0^{N(t_K)} \frac{dN}{[N_K - N]} = \int_0^{t_K} \left[ \nu \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{kT_K}\right) \right] dt, \quad (7)$$

где  $N_K(t_K)$  – общее количество атомов на выделенной поверхности раздела “частица покрытия – подложка”, которые установят физический контакт к моменту  $t_K$  завершения стадии ударного взаимодействия частицы с подложкой;

$N(t_K)$  – количество атомов из числа  $N_K(t_K)$ , которые прореагируют к моменту окончания времени ударного взаимодействия;

$t_K$  – продолжительность стадии ударного взаимодействия.

В предлагаемой постановке задачи об установлении химических связей между реагирующими атомами жидкой частицы покрытия и твердой подложки из лопаточного материала предполагается возможность перехода от реального нестационарного процесса физико-химического взаимодействия к конечной последовательности стационарных процессов, в которых гидродинамические параметры в пределах выделенных кольцевых зон контактной области можно считать постоянными.

Последовательные малые интервалы времени взаимодействия, а также размеры в радиальном направлении выделяемых на пятне контакта капли с подложкой кольцевых зон, возникающих при деформировании капли, для которых может быть принято такое допущение, определяются с помощью зависимостей (2) и (3).

Учитывая физический смысл величины  $N_K(t_K)$ , которая для любого момента  $t_i$  времени взаимодействия капли расплава материала покрытия с твердой подложкой, должна удовлетворять условию

$$N_K(t_K) > N(t_i),$$

из уравнения (7) получим:

$$\ln \left[ \frac{N_K(t_K)}{N_K(t_K) - N(t_K)} \right] = \left[ \nu \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{kT_K}\right) \right] \cdot t_0 + \sum_{i=1}^{i=i_K} \left[ \nu \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{kT_K}\right) \right] \cdot (t_i - t_{i-1}), \quad (8)$$

где индекс  $i = i_K$  соответствует завершающему моменту  $t = t_K$  времени ударного взаимодействия жидкой частицы покрытия с поверхностью твердой подложки, который определяется по формуле (4).

Полученное выражение (8) представляет собой математическую модель нестационарного физико-химического процесса формирования химических связей между атомами жидкой частицы керметного покрытия, напыляемого плазмой, и подложки из лопаточного материала в пределах любой из кольцевых зон, выде-

ляемых на расширяющемся пятне контакта, в условиях высокоскоростного соударения частицы с подложкой. Данная формула полностью корреспондирует аналогичному по своему физическому смыслу формулы В.В. Кудинова [2 – 4], которое отвечает условиям ударного взаимодействия жидкой частицы покрытия с твердой подложкой при сравнительно небольших скоростях нормального удара ( $V_0 \leq 100$  м/с).

Действительно, кинетическое уравнение роста прочности сцепления с подложкой частиц плазменного покрытия, предложенное В.В. Кудиновым [2 – 4], можно получить из уравнения (8), как частный случай, если отбросить члены, позволяющие учитывать нестационарность физико-химического процесса формирования химических связей на пятне контакта.

При высокой скорости напыляемых частиц ( $V_0 \geq 200$  м/с) давление, возникающее на пятне контакта жидкой частицы с подложкой, существенно ускоряет процесс их соединения (приваривания частицы) за счет упругого искажения кристаллической решетки подложки в месте удара частицы [4]. Это повышает прочность и улучшает качество плазменного покрытия.

Промежуточное значение относительной прочности соединения частицы покрытия с подложкой, которое возникает в какой-либо выделенной кольцевой зоне пятна контакта к моменту времени  $t_i$  при использовании величины среднеинтегрального давления в данной зоне, определяемой для каждого интервала времени  $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$ , можно определить по формуле:

$$\ln \left[ 1 - \frac{N(t_i)}{N_K(t_K)} \right] = -t_0 \cdot v \cdot \exp \left( -\frac{E_a}{kT_K} \right) - \sum_{i=1}^{i_{\max}} \left[ v \cdot \exp \left( -\frac{E_a}{kT_K} \right) \right] \cdot (t_i - t_{i-1}). \quad (9)$$

Результаты численных исследований давления, на пятне контакта капли расплава одного из компонентов керметного покрытия (оксида алюминия) с поверхностью подложки из лопаточного материала

(20Х13) при скоростях нормального удара ( $V_0 \geq 200$  м/с) позволяют заключить следующее.

Среднеинтегральное давление, определенное на площади всего пятна контакта между частицей и подложкой является величиной постоянной для любого момента времени определяемого по формуле (1). Этот вывод корреспондирует данным численных исследований [3, 4].

Таким образом, если проводить анализ процесса физико-химического взаимодействия жидкой частицы плазменного покрытия и твердой подложки на основе среднеинтегрального давления, определяемого в пределах всей площади пятна контакта, то его можно рассматривать как изобарный [3, 4].

Реально действующее на пятне контакта давление удара является нестационарным как во времени, так и в пространстве (в контактной области с подвижной границей), что хорошо иллюстрирует рис. 1. Нестационарным является также и среднеинтегральное давление, определяемое не в пределах всего пятна контакта, а только в пределах последовательно возникающих на каждом шаге  $\Delta t_i$  по времени ударного взаимодействия кольцевых зон в контактной области, которые образуются при деформировании жидкой частицы покрытия и расширении ее пятна контакта с твердой подложкой.

Для капли жидкости (расплава оксида алюминия) с плотностью

$$\rho_{ж} = 3810 \text{ кг/м}^3,$$

которая имеет радиус

$$r_k = 50 \text{ мкм}$$

и падает на поверхность стальной подложки со скоростью нормального удара, равной

$$V_0 = 300 \text{ м/с},$$

имеем следующее.

В кольцевой зоне пятна контакта, которая образуется на первом шаге по времени ударного взаимодействия

$$\Delta t_1 = t_1 - t_0 = 0,55 \cdot 10^{-7} \text{ с}$$

и характеризуется шириной

$$\Delta L_1 = L_1 - L_0 = 6,2 \cdot 10^{-5} \text{ м},$$

действует среднеинтегральное давление, равное

$$p_{\kappa, \text{cp}, \kappa}(t_1) = 0,189 \cdot \rho_{\text{жс}} \cdot L_{\kappa} \cdot V_0$$

( $L_{\kappa}$  – радиус пятна контакта, возникающего к моменту времени  $t_{\kappa}$ ).

В той же самой кольцевой зоне пятна контакта на втором шаге по времени взаимодействия в течение интервала времени

$$\Delta t_2 = t_2 - t_1 = 0,43 \cdot 10^{-7} \text{ с}$$

действует среднеинтегральное давление, равное

$$p_{\kappa, \text{cp}, \kappa}(t_2) = 0,352 \cdot \rho_{\text{жс}} \cdot L_{\kappa} \cdot V_0,$$

которое превышает в 1,86 раз такое же давление, которое действовало в этой зоне в течение интервала времени  $\Delta t_1$ .

В рассматриваемой кольцевой зоне пятна контакта на пятом временном шаге в течение интервала времени

$$\Delta t_5 = t_5 - t_4 = 0,42 \cdot 10^{-7} \text{ с}$$

действует среднеинтегральное давление

$$p_{\kappa, \text{cp}, \kappa}(t_5) = 0,434 \cdot \rho_{\text{жс}} \cdot L_{\kappa} \cdot V_0,$$

которое превышает в 1,2 раз такое же давление, которое действовало в этой зоне в течение интервала времени  $\Delta t_1$ .

Необходимость учета нестационарности среднеинтегрального давления в различных кольцевых зонах пятна контакта жидкой частицы плазменного покрытия с твердой поверхностью подложки, которая проявляется в этих зонах в пределах малых интервалов времени контактного взаимодействия  $\Delta t_i$ , объясняется следующим.

На удаленных от центра удара периферийных границах кольцевых зон, последовательно возникающих на пятне контакта и отвечающих ряду дискретных значений  $t_i$  времени ударного взаимодействия капли с подложкой, которые вычисляются по формуле (2), давление постепенно возрастает от нуля, приближаясь с каждым очередным шагом по времени взаимодействия, к значению:

$$p^* = 0,51 \cdot \rho_{\text{жс}} \cdot L_{\kappa} \cdot V_0. \quad (10)$$

При этом возрастает также и среднеинтегральное давление, которое вычисляется в пределах отдельных кольцевых зон с шириной  $\Delta L_i$ .

Каждое слагаемое в (9) справа от знака равенства, имеет множитель

$$K_c = v \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{kT_{\kappa}}\right).$$

Рассмотрим подробнее каждый из членов, входящих в состав данного комплекса.

Величина  $v$  представляет собой частоту колебаний атомов в материале подложки. На основании данных работ [3, 4] при нанесении плазмой керметного покрытия на подложку из лопаточного материала (20X13) ее можно принять равной

$$v = 10^{13} \text{ сек}^{-1}.$$

Абсолютная температура  $T_{\kappa}$  на пятне контакта, с учетом данных [2 – 4], также может быть принята постоянной;  $k$  является физической константой по определению (постоянная Больцмана).

С другой стороны, в работах [2 – 4] представлены экспериментальные данные, которые показывают, что энергия активации  $E_a$ , также входящая в рассматриваемый комплекс, сильно зависит от давления на пятне контакта. Это хорошо иллюстрирует кривая, приведенная на рис. 3.

Шаг по времени  $\Delta t_i$ , входящий множителем в каждое из слагаемых в правой части выражения (9), практически не изменяется с увеличением индекса суммирования ( $i$ ) на единицу.

Таким образом, для любой пары слагаемых в правой части выражения (9) выполняется условие:

$$v \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{kT_{\kappa}}\right) \cdot (t_{i+1} - t_i) > v \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{kT_{\kappa}}\right) \times (t_i - t_{i-1}). \quad (11)$$

Условие (11) выполняется всегда, поскольку среднеинтегральное давление в пределах любой из выделенных кольцевых зон в интервале времени



$\Delta t_{i+1} = t_{i+1} - t_i$  будет всегда больше того же давления в интервале времени  $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$ , а величина произведения в правой и левой части данного неравенства определяется величиной быстро убывающего с ростом среднеинтегрального давления экспоненциального делителя.

Таким образом, при постоянной температуре на поверхности подложки для любой скорости нормального удара ( $V_0 > 100$  м/с) в кольцевых зонах пятна контакта, расположенных ближе к центру удара напыляемой частицы, количество связей, возникающих между ее атомами и атомами подложки, будет всегда больше, чем в кольцевых зонах, более удаленных от этого центра.

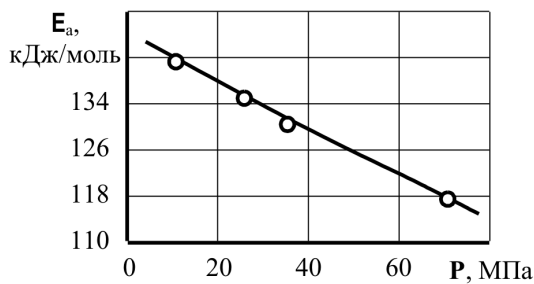


Рис. 3. Изменение энергии активации  $E_a$  под действием среднеинтегрального давления  $p$ , которое возникает на пятне контакта жидкой частицы расплава металла (серебра) с твердой полированной поверхностью металлической (серебряной) подложки при плазменном напылении

В [2 – 4] экспериментальным путем было показано, что повышение давления удара понижает энергию активации и повышает скорость реакции между атомами частицы и подложки в зоне контакта.

Это означает, что давление на пятне контакта является одним из основных факторов процесса соединения (приваривания) частицы покрытия, напыляемого плазмой, с поверхностью подложки, а прочность возникающего при этом соединения необходимо определять с учетом нестационарности давления в контактной области, которая проявляется тем сильнее, чем выше скорость нормального со-

ударения частицы с подложкой.

Предложенная в данной работе математическая модель процесса соединения частицы покрытия с подложкой позволяет адаптировать теорию нанесения плазменных покрытий, разработанную В.В. Кудиновым [2 – 4], к условиям высокоскоростного удара ( $V_0 \geq 200$  м/с) жидких частиц керметного покрытия по напыляемой поверхности подложки из лопаточного материала.

Прочность покрытия определяется отношением силы  $P$ , которую необходимо приложить для отделения частицы от подложки, к площади  $F_x$  пятна химического взаимодействия частицы с подложкой.

Она зависит от температуры  $T_k$ , которая устанавливается на пятне контакта капли расплава материала покрытия с твердой подложкой, скорости нормального удара капли по поверхности подложки  $V_0$  и продолжительности стадии ударного взаимодействия капли с подложкой [2 – 4].

На рис. 4 показана схема экспериментального определения прочности плазменного покрытия [4].

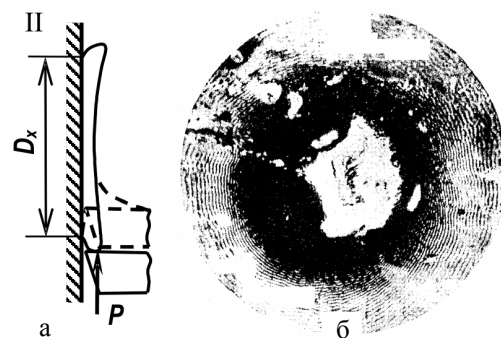


Рис. 4. Схема экспериментального определения прочности сцепления частицы покрытия, нанесенной плазмой, с поверхностью подложки:  
 а – схема отделения от подложки затвердевшей частицы покрытия силой  $P$ ;  
 $D_x$  – диаметр пятна химического взаимодействия атомов частицы с атомами подложки (он может совпадать с диаметром пятна контакта частицы в конце процесса ее деформирования);  
 б – вид подложки после удаления с ее поверхности приваренной частицы

плазменного покрытия

Результаты анализа [3, 4] поверхности излома, которая возникает на подложке после механического удаления приваренной частицы покрытия, показывают (рис. 4), что наиболее интенсивно процесс формирования химических связей между атомами частицы и подложки развивается в центральной зоне пятна контакта, а наименьшая интенсивность данного процесса наблюдается на его периферии.

### Заключение

С учетом представленных выше данных можно заключить следующее.

1. Предложенная математическая модель нестационарного давления удара, возникающего на пятне контакта жидкой сферической частицы керметного покрытия, наносимого плазмой, с подложкой из лопаточного материала (20X13), представленная зависимостями (1) – (5), находит качественное подтверждение.

2. Такое же качественное подтверждение находит математическая модель нестационарного физико-химического процесса формирования химических связей между атомами частицы керметного покрытия, наносимого плазмой, и стальной подложки на пятне контакта с подвижной границей, которая представлена зависимостью (8).

3. На базе разработанных математических моделей предложен удобный для реализации на ПЭВМ метод расчета прочности сцепления частиц плазменного СВЧ-поглощающего керметного покрытия с поверхностью подложки из лопаточного материала, отвечающий условиям высокоскоростного удара по поверхности подложки напыляемых частиц.

Необходимо проведение дальнейших исследований по определению влияния волны Релея, обусловленного высокоскоростным ударом, на прочность сцепления с подложкой напыляемых частиц керметного покрытия.

### Литература

1. Ковальский А.Э., Картмазов Г.Н., Суслов Н.Н. Новый способ активной защиты рабочих лопаток последних ступеней энергетических турбин от эрозионного износа // Пробл. машиностроения. – 2005. – Т. 8, № 2. – С. 6-18.
2. Кудинов В.В., Пекшев П.Ю., Белашенко В.Е. Нанесение покрытий плазмой. – М.: Наука, 1990. – 408 с.
3. Кудинов В.В. Нанесение покрытий распылением // Плазменные процессы в металлургии и технологии неорганических материалов. – М.: Наука, 1973. – С. 158-187.
4. Кудинов В.В. Плазменные покрытия. – М.: Наука, 1977. – 184 с.
5. Ковальский А.Э. Математическая модель высокоскоростного удара эрозионно-опасной капли конденсата по рабочей лопатке влажно-паровой ступени энергетической турбины // Вестник двигателестроения. – 2004. – № 2. – С. 51-59.
6. Ковальский А.Э. Теоретическое обоснование механизма каплеударной эрозии рабочих лопаток осевых турбомашин // Авіаційно - космічна техніка і технологія: Зб. наук. праць. – Х.: ХАІ, 2001. – Вып. 23. Двигуни та енергоустановки. – С. 33-41.
7. Эрозия / Под ред. К. Прис. – М.: Мир, 1982. – 464 с.
8. Перельман Р.Г. Эрозионная прочность деталей и энергоустановок летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1980. – 245 с.
9. Хмельник М.И. Удар сферической капли о твердую поверхность // Изв. АН СССР. ОТН. Механика и машиностроение. – 1961. – № 4. – С. 167-169.

*Поступила в редакцию 8.06.2007*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.И. Змий, Национальный научный центр “Харьковский физико-технический институт”, Харьков.