

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ
ИНСТИТУТ ТЕПЛО- и МАССООБМЕНА им. А. В. ЛЫКОВА
Журнал основан в январе 1958 г.

ИФЖ

И
**ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ**

**JOURNAL
OF ENGINEERING PHYSICS
AND THERMOPHYSICS**

**Отдельный оттиск
Offprint**

Том 77, N 2

Vol. 77, No. 2

**МАРТ-АПРЕЛЬ
MARCH-APRIL**

2004

УДК 621.7.044

А. В. Алифанов, В. М. Голуб, В. В. Алехнович**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ГАЗОТЕРМИЧЕСКОМ НАПЫЛЕНИИ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ**

Изучены особенности теплового режима газотермического нанесения металлокерамических покрытий. Разработана методика расчета температурного поля многокомпонентного покрытия в течение всего процесса формирования. Установлены количественные зависимости характера прогрева наносимых частиц и проплавления подложки от теплофизических свойств и химического состава материала, интенсивности теплообмена и технологических параметров процесса. Определены тепловые условия напыления порошковых композиций, обеспечивающие повышенные прочностные характеристики системы покрытие-подложка.

Процесс нанесения металлокерамических покрытий в условиях газотермического напыления представляет собой сложную совокупность разнородных по физическому, химическому и термодинамическому содержанию явлений, взаимодействующих друг с другом в течение всего цикла производства. Для эффективного исследования особенностей их формирования необходимо выделить из всех явлений, которые имеют место в течение процесса, основные и, изучив их, установить необходимые взаимосвязи между различными технологическими параметрами.

Анализ показывает, что в большинстве случаев при нанесении покрытий газотермическим напылением одну из основных ролей играют тепловые процессы. Изучение явлений теплообмена позволяет установить основные зависимости между различными процессами и разработать эффективные методы определения оптимальных режимов напыления. Характерной особенностью исследуемого процесса является то, что при нагреве частиц и динамическом воздействии их на подложку практически исключается их взаимное термическое влияние. Это в значительной мере позволяет упростить теоретическую схему анализа взаимодействия частиц с основой и газовым потоком.

Для напыления металлокерамических покрытий обычно используются разнообразные смеси металлических и керамических порошков, которые имеют различные теплофизические свойства и по-разному в тепловом отношении взаимодействуют с газовым потоком и подложкой. При теоретическом анализе влияние состава покрытия на процесс теплообмена может быть приближенно учтено путем использования эффективных теплофизических коэффициентов, учитывающих индивидуальные свойства отдельных компонентов и их относительное содержание в материале. В некоторых случаях при анализе формирования металлокерамических покрытий возникает необходимость рассматривать особенности теплообмена каждой составляющей наносимого материала.

При формировании покрытий в условиях газотермического напыления порошковых материалов различают термическое взаимодействие частиц порошка с газовым потоком и подложкой. Эти процессы в значительной степени обуславливают прочностные свойства и структуру напыленного материала.

Начальной стадией формирования покрытия при газотермическом напылении порошка является процесс теплового взаимодействия наносимого материала с газовым потоком. При этом в общем случае происходит прогрев, плавление, сфероидизация и охлаждение частиц порошка. На ход тепловых процессов оказывают большое влияние теплофизические свойства наносимого материала, конфигурация, структура, размеры и характер перемещения частиц в газовом потоке.

Для получения металлокерамических покрытий в условиях газопламенного напыления широкое распространение получили различного рода порошковые материалы. При этом частицы порошка вводятся в газовый поток, который транспортирует их к основе. Для определения особенностей теплового взаимодействия частиц с газовым потоком необходимо установить характер изменения температурного поля системы частица-окружающая среда в течение всего процесса, начиная от момента ввода частицы в газовый поток и заканчивая моментом соприкосновения ее с подложкой. При этом будем считать, что частица имеет сферическую форму и перемещается в газовом потоке, обладающем постоянной температурой. В действительности скорость потока превышает скорость движения частиц. Кроме того, температура газового потока уменьшается по мере приближения его к подложке. Для расчетов необходимо использовать среднюю температуру на определенном участке потока, протяженность которого может быть сколь угодно малой. На этом участке изменение температуры потока будет весьма незначительным и ее величину можно принять постоянной. При решении задачи примем также, что теплофизические коэффициенты частиц известны и постоянны. Учет влияния состава материала на величину этих коэффициентов осуществляется путем использования их эффективных значений, рассчитанных по правилу аддитивности. Рассмотрим далее особен-

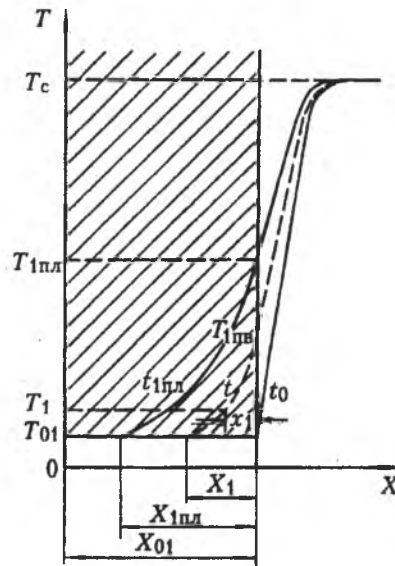


Рис. 1. Схема распределения температуры в системе частица-газовый поток

ности нагрева частицы до температуры плавления, что является наиболее характерным для процесса напыления керамических материалов.

Процесс нагрева частицы начинается с момента ввода ее в газовый поток и заканчивается при достижении ее поверхностью температуры плавления материала $T_{1пл}$. Продолжительность стадии составляет $t_{1пл}$, глубина прогрева в момент $t = t_{1пл}$ достигает величины $X_{1пл}$. В течение этого процесса происходит распространение фронта тепла от поверхности в глубь частицы (рис. 1).

Для определения закономерностей изменения температурного поля сферической частицы воспользуемся методом исключения переменных [1]. С целью сокращения числа независимых переменных зададимся распределением температуры по сечению частицы в виде параболы n_1 -го порядка

$$T_1 = T_{01} + (T_{1пв} - T_{01}) \left(1 - \frac{x_1}{X_1} \right)^{n_1} \quad (1)$$

Для установления характера изменения распределения температуры в частице необходимо составить дифференциальное уравнение теплового баланса, которое должно объединять количество тепла $dQ_{1\alpha}$, подведенное к поверхности частицы со стороны газового потока за время dt , количество тепла $dQ_{1\tau}$, отведенное от поверхности теплопроводностью за тот же промежуток dt , и количество аккумулированной теплоты $dQ_{1ак}$, т. е.

$$dQ_{1\alpha} = dQ_{1\tau} = dQ_{1ак} \quad (2)$$

Величина $dQ_{1\alpha}$ определяется по закону Ньютона [1]

$$dQ_{1\alpha} = \alpha_1 (T_c - T_{1пв}) F_q dt, \quad (3)$$

а $dQ_{1\tau}$ находится из закона теплопроводности Фурье [1] и при параболическом распределении температуры в частице равно

$$dQ_{1\tau} = n_1 \frac{\lambda_1}{X_1} (T_{1пв} - T_{01}) F_q dt. \quad (4)$$

Сопоставив найденные количества теплоты $dQ_{1\alpha}$ и $dQ_{1\tau}$, находим зависимость глубины прогреваемого слоя частицы от температуры

$$X_1 = n_1 \frac{\lambda_1}{\alpha_1} \frac{T_{1пв} - T_{01}}{T_c - T_{1пв}} \quad (5)$$

Выражение для элементарного количества аккумулированной теплоты, полученное при условии использования средней интегральной температуры [1] и соотношения (5), имеет вид

$$dQ_{1ак} = \frac{n_1}{n_1 + 1} \frac{b_1^2}{\alpha_1} F_q \frac{T_{1пв} - T_{01}}{(T_c - T_{1пв})^2} \left[2T_c - T_{1пв} - \frac{2n_1}{(n_1 + 1) f_1} \frac{T_{1пв} - T_{01}}{T_c - T_{1пв}} (3T_c - T_{1пв}) + \frac{2}{(n_1 + 2)(n_1 + 3)} \left(\frac{n_1}{f_1} \right)^2 \left(\frac{T_{1пв} - T_{01}}{T_c - T_{1пв}} \right)^2 (4T_c - T_{1пв}) \right] dT_{1пв}, \quad (6)$$

где $f_1 = \alpha_1 X_{01} / \lambda_1$; $b_1 = \sqrt{\lambda_1 \gamma_1 c_1}$.

Подставив в уравнение (2) вместо $dQ_{1\alpha}$ и $dQ_{1ак}$ соответствующие им значения из (3) и (6) и проинтегрировав его от t_0 до t и от $T_{01пв}$ до $T_{1пв}$, получим зависимость температуры поверхности частицы от времени

$$t - t_0 = A_1 \left[\left(\frac{T_c - T_{01}}{T_c - T_{1пв}} \right)^2 - \left(\frac{T_c - T_{01}}{T_c - T_{01пв}} \right)^2 \right] + A_2 \left[\left(\frac{T_c - T_{01}}{T_c - T_{1пв}} \right)^3 - \left(\frac{T_c - T_{01}}{T_c - T_{01пв}} \right)^3 \right] + A_3 \left[\left(\frac{T_c - T_{01}}{T_c - T_{1пв}} \right)^4 - \left(\frac{T_c - T_{01}}{T_c - T_{01пв}} \right)^4 \right] + A_4 \ln \frac{T_c - T_{1пв}}{T_c - T_{01пв}}, \quad (7)$$

где

$$A_1 = \frac{n_1}{2(n_1 + 1)} \left(\frac{b_1}{\alpha_1} \right)^2 \left\{ 1 + 6 \left[\frac{n_1}{(n_1 + 2)f_1} + \frac{3}{(n_1 + 2)(n_1 + 3)} \left(\frac{n_1}{f_1} \right)^2 \right] \right\};$$

$$A_2 = -\frac{4}{3} \frac{n_1}{n_1 + 1} \left(\frac{b_1}{\alpha_1} \right)^2 \left[\frac{n_1}{(n_1 + 2)f_1} + \frac{4}{(n_1 + 2)(n_1 + 3)} \left(\frac{n_1}{f_1} \right)^2 \right];$$

$$A_3 = \frac{3}{2} \frac{n_1}{n_1 + 1} \left(\frac{b_1}{\alpha_1} \right)^2 \frac{1}{(n_1 + 2)(n_1 + 3)} \left(\frac{n_1}{f_1} \right)^2;$$

$$A_4 = \frac{n_1}{n_1 + 1} \left(\frac{b_1}{\alpha_1} \right)^2 \left\{ 1 + \frac{2n_1}{(n_1 + 2)f_1} \left[1 + \frac{n_1}{(n_1 + 3)f_1} \right] \right\}.$$

Выражения (1) и (7) позволяют находить распределение температуры в частице при прогреве ее в газовом потоке до момента начала плавления.

Продолжительность прогрева частицы до начала плавления $t_{1пл}$ находится из соотношения (7) при условиях $t_0 = 0$, $T_{01пв} = T_{01}$ и $T_{1пв} = T_{1пл}$. Имеем

$$t_{1пл} = A_1 \left(\frac{T_c - T_{01}}{T_c - T_{1пл}} \right)^2 + A_2 \left(\frac{T_c - T_{01}}{T_c - T_{1пл}} \right)^3 + A_3 \left(\frac{T_c - T_{01}}{T_c - T_{1пл}} \right)^4 + A_4 \ln \frac{T_c - T_{1пл}}{T_c - T_{01}}. \quad (8)$$

Глубина прогретого слоя частицы в момент начала ее расплавления определяется из (5) при условии $T_{1пв} = T_{1пл}$

$$X_{1пл} = n_1 \frac{\lambda_1}{\alpha_1} \frac{T_{1пл} - T_{01}}{T_c - T_{1пл}}. \quad (9)$$

При расчете процесса теплового взаимодействия частицы с газовым потоком важное значение приобретают такие параметры, как скорости изменения температуры и продвижения фронта прогрева частицы. Первая величина определяется из (7), вторая – из (5).

Полученные формулы позволяют исследовать особенности процесса нагрева частиц порошка в газовом потоке до момента достижения их поверхностью температуры плавления материала, что является характерным при газотермическом напылении керамических порошковых материалов.

Рассмотрим далее особенности теплового взаимодействия частиц порошка с подложкой.

Условия теплообмена на границе контакта частиц напыляемого порошка с подложкой в значительной степени обуславливают качество и прочность сцепления покрытия с основой. При взаимодействии напыляемого вещества с основой в общем случае происходит деформирование частиц порошка с последующим их охлаждением. При этом наблюдается локальный разогрев подложки непосредственно под границей контакта ее с частицей. Экспериментально установлено [2, 3 и др.], что при напылении на гладкую поверхность последние приобретают форму цилиндра при отношении высоты к диаметру 0.01–0.05, т. е. в тепловом отношении частица, сдеформированная при взаимодействии с подложкой, представляет собой неограниченную плоскую пластину. С другой стороны, основа в большинстве случаев имеет толщину, значительно превышающую поперечные размеры частицы, и при решении тепловой задачи ее можно рассматривать как полубесконечное тело.

Анализ формирования различных покрытий позволил установить, что даже при максимальной производительности процесса напыления каждая частица нагревается, деформируется и охлаждается строго индивидуально [2]. Вероятность их взаимного теплового влияния практически отсутствует.

Таким образом, при рассмотрении теплового режима взаимодействия частиц с основой при формировании покрытия в условиях газотермического напыления задача фактически сводится к анализу распределения температурного поля в системе отдельная частица–основа. При этом деформированную частицу можно с полным основанием рассматривать как неограниченную пластину (плоскую стенку), а основу – как полубесконечное тело.

Необходимо определить температурное поле системы частица–подложка в течение процесса их теплового взаимодействия. В начальный период частица представляет собой ограниченный только в поперечном на-

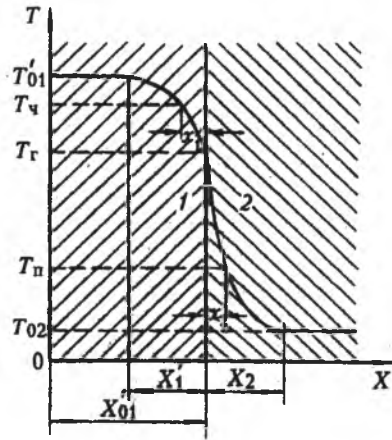


Рис. 2. Схема распределения температуры в системе частица-подложка: 1, 2 – материал частицы и подложки

правлении объем материала с температурой T'_{01} и толщиной X'_{01} (рис. 2). Начальная температура основы составляет T_{02} . Решение задачи осуществим при условии постоянства теплофизических коэффициентов системы и температуры плавления материала, а также при параболическом распределении температуры в частице и основе [4]. В зависимости от режима напыления и физико-механических свойств материала компонентов системы имеют место различные случаи теплового взаимодействия частицы с основой. При этом наиболее характерен процесс, в течение которого компоненты системы находятся в твердом состоянии.

Одним из основных параметров, определяющим характер формирования покрытия при напылении, является температура на границе контакта частицы с основой (подложкой) T_r . Рассмотрим далее процесс теплового взаимодействия частицы с основой без изменения их агрегатного состояния (рис. 2).

При параболическом распределении температуры в частице и подложке система дифференциальных уравнений теплового баланса процесса имеет вид

$$\frac{1}{n_1 + 1} \gamma_1 c_1 (T'_{01} - T_r) dX'_1 = n_1 \frac{\lambda_1}{X'_1} (T'_{01} - T_r) dt, \quad (10)$$

$$n_1 \frac{\lambda_1}{X'_1} (T'_{01} - T_r) dt = n_2 \frac{\lambda_2}{X_2} (T_r - T_{02}) dt, \quad (11)$$

$$n_2 \frac{\lambda_2}{X_2} (T_r - T_{02}) dt = \frac{1}{n_2 + 1} \gamma_2 c_2 (T_r - T_{02}) dX_2. \quad (12)$$

Производя разделение переменных, некоторые преобразования и интегрирование уравнения (10) от 0 до t и от 0 до X'_1 , получаем зависимость глубины охлажденного слоя частицы от времени

$$X'_1 = \sqrt{2n_1(n_1 + 1) \frac{\lambda_1}{\gamma_1 c_1} t}. \quad (13)$$

Аналогичным образом из (12) находим глубину прогретого слоя подложки

$$X_2 = \sqrt{2n_2(2n_2 + 1) \frac{\lambda_2}{\gamma_2 c_2} t}. \quad (14)$$

Из совместного решения (11), (13) и (14) получаем зависимость для определения температуры на границе контакта частицы с подложкой

$$T_r = \frac{b_1 T'_{01} + m b_2 T_{02}}{b_1 + m b_2}, \quad (15)$$

где $b_2 = \sqrt{\lambda_2 \gamma_2 c_2}$; $m = \sqrt{\frac{n_2(n_1 + 1)}{n_1(n_2 + 1)}}$.

Выражение (15) при условии $n_1 = n_2$ приводится к соотношению для определения температуры идеального контакта двух тел [4]. Как следует из (15), величина T_r остается постоянной в течение всего процесса продвижения фронта охлаждения до наружной поверхности частицы и находится в непосредственной зависимости от теплофизических характеристик и начальных значений температур компонентов системы.

При известном значении величины T_r распределение температуры в частице определяется из выражения

$$T_q = T'_{01} - (T'_{01} - T_r) \left(1 - \frac{x_1}{X'_1}\right)^{n_1} \quad (16)$$

и соответственно в подложке –

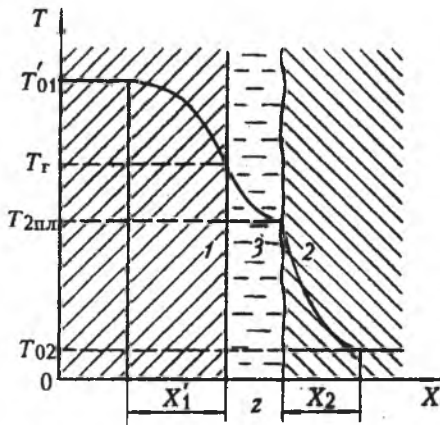


Рис. 3. Схема распределения температуры в системе частица-подложка при проплавлении материала подложки: 1, 2 – материал частицы и подложки; 3 – проплавленный материал подложки

$$T_{II} = T_{02} + (T_{Г} - T_{02}) \left(1 - \frac{x_2}{X_{02}} \right)^{n_2} \quad (17)$$

Полученные формулы (15)–(17) позволяют определять температурное поле системы частица-подложка в течение основного периода формирования покрытий.

Для случая термического взаимодействия частицы с подложкой в условиях проплавления основного материала, что наблюдается при напылении высокотемпературных керамических порошков на металлическую подложку (рис. 3), уравнение теплового баланса процесса имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{1}{n_1 + 1} \gamma_1 c_1 (T'_{01} - T_{Г}) X'_1 &= \gamma_2 r_{пл} z + \gamma_2 c_2 (T_{2пл} - T_{02}) z + \\ + \frac{1}{n'_2 + 1} \gamma_2 c'_2 (T_{Г} - T_{2пл}) z &+ \frac{1}{n_2 + 1} \gamma_2 c_2 (T_{2пл} - T_{02}) X_2. \end{aligned} \quad (18)$$

Для решения уравнения (18) необходимо установить дополнительные связи между переменными X'_1 , $T_{Г}$, X_2 и z . Осуществим это следующим образом.

Из условия теплообмена на границе контакта частицы с подложкой с учетом передачи тепла в тонком слое расплава только теплопроводностью [5] дифференциальное уравнение теплового баланса может быть представлено как

$$n_1 \frac{\lambda_1}{X'_1} (T'_{01} - T_{Г}) dt = n'_2 \frac{\lambda'_2}{z} (T_{Г} - T_{2пл}) dt \quad (19)$$

Решение уравнения (19) дает зависимость толщины проплавленного слоя подложки от величины $T_{Г}$ и глубины охлажденной области частицы

$$z = \frac{n'_2 \lambda'_2}{n_1 \lambda_1} \frac{T_{Г} - T_{2пл}}{T'_{01} - T_{Г}} X'_1 \quad (20)$$

Подставив вместо величин X'_1 , z и X_2 соответствующие им значения из (13), (20) и (14) в уравнение (18) и осуществив некоторые преобразования, получим зависимость для определения температуры на границе контакта частицы и подложки

$$\begin{aligned} T_{Г} = & \left\{ \frac{2n'_2}{n'_2 + 1} b_2^2 T_{2пл} + n_1 \lambda_1 \frac{\gamma_2 c_2}{n_2 + 1} (T_{2пл} - T_{02}) \sqrt{\frac{n_2 (n_2 + 1) a_2}{n_1 (n_1 + 1) a_1}} + \frac{2n_1}{n_1 + 1} b_1^2 T'_{01} - \right. \\ & - n'_2 \lambda'_2 [\gamma_2 r_{пл} + \gamma_2 c_2 (T_{2пл} - T_{Г})] \left. \right\} + \left\{ \left[\frac{2n'_2}{n'_2 + 1} b_2^2 T_{2пл} + n_1 \lambda_1 \frac{\gamma_2 c_2}{n_2 + 1} (T_{2пл} - T_{02}) \sqrt{\frac{n_2 (n_2 + 1) a_2}{n_1 (n_1 + 1) a_1}} + \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{2n_1}{n_1 + 1} b_1^2 T'_{01} - n'_2 \lambda'_2 [\gamma_2 r_{пл} + \gamma_2 c_2 (T_{2пл} - T_{02})] \right]^2 + 4 \left[\frac{n'_2}{n'_2 + 1} b_2^2 - \frac{n_1}{n_1 + 1} b_1^2 \right] \times \right. \\ & \left. \times \left[\frac{n'_2}{n'_2 + 1} b_2^2 T_{2пл}^2 - n'_2 \lambda'_2 [\gamma_2 r_{пл} + \gamma_2 c_2 (T_{2пл} - T_{02})] T_{2пл} + n_1 \lambda_1 \frac{\gamma_2 c_2}{n_2 + 1} (T_{2пл} - T_{02}) \times \right. \right. \end{aligned}$$

$$\times \sqrt{\frac{n_2(n_2+1)a_2}{n_1(n_1+1)a_1} T'_{01} - \frac{n_1}{n_1+1} (b_1 T'_{01})^2} \Bigg\}^{1/2} \Bigg\{ \frac{1}{2} \left[\frac{n'_2}{n'_2+1} b_2^2 - \frac{n_1}{n_1+1} b_1^2 \right] \Bigg\}^{-1} \quad (21)$$

где $b'_2 = \sqrt{\lambda'_2 \gamma'_2 c'_2}$.

Выражение (21) позволяет рассчитывать температуру на границе контакта частицы с подложкой в условиях ее проплавления. При известной величине T_Γ легко определяются значения X'_1 , X_2 , z , а также температурное поле системы из соотношений (13)–(17), (20).

При формировании металлокерамических покрытий в качестве материала для газотермического напыления обычно применяется смесь порошка керамики и металла, что обуславливает характерные тепловые условия в процессе взаимодействия частиц с подложкой. Определение температурного поля в металлокерамическом покрытии можно приближенно осуществить с помощью полученных закономерностей при использовании значений эффективных теплофизических коэффициентов материала напыляемых частиц. Например, плотность металлокерамического материала может быть определена соотношением [6]

$$\gamma_{эф} = \gamma_K V_K + \gamma_M (1 - V_K), \quad (22)$$

удельная теплоемкость

$$c_{эф} = c_K P_K + c_M (1 - P_K), \quad (23)$$

коэффициент теплопроводности [7]

$$\lambda_{эф} = \lambda_M \left(1 + \frac{V_K}{(1 - V_K)/3 + \lambda_M/(\lambda_K - \lambda_M)} \right). \quad (24)$$

В условиях напыления металлокерамических материалов при расчете температурного поля по выведенным формулам необходимо вместо величин λ_1 , c_1 и γ_1 использовать их эффективные значения из (22)–(24).

Таким образом, проведенный анализ позволяет осуществлять приближенную оценку теплового режима формирования металлокерамических покрытий в условиях газотермического напыления, а также правильно подойти к выбору наиболее рациональных технологических параметров процесса.

Обозначения

a_1 и a_2 – коэффициенты температуропроводности материала частицы и подложки, m^2/c ; c_1 , c_2 и c'_2 – удельные теплоемкости материалов частицы, твердой и жидкой подложки, Дж/(кг·град); c_K , c_M и $c_{эф}$ – удельная теплоемкость керамического материала, металла и их смеси, Дж/(кг·град); F_χ – площадь поверхности частицы, m^2 ; F_Γ – площадь контакта частицы и подложки, m^2 ; n_1 , n_2 и n'_2 – показатели степени параболичности кривой распределения температуры в частице, подложке и расплавленном материале подложки; P_K – относительное массовое содержание керамики в материале; $Q_{1\alpha}$, $Q_{1\Gamma}$ и $Q_{1ак}$ – переданная, отведенная и аккумулированная теплота, Дж; $r_{пл}$ – удельная теплота плавления подложки, Дж/кг; T_{01} и T_1 – начальная и текущая температура частицы, $^{\circ}C$; $T_{01пв}$ и $T_{1пв}$ – начальная и текущая поверхностная температура частицы, $^{\circ}C$; T_c – температура среды (газового потока), $^{\circ}C$; T_{01} и T_{02} – значения температур частицы и подложки в начальный момент контакта, $^{\circ}C$; $T_{1пл}$ и $T_{2пл}$ – температура плавления материала частицы и подложки, $^{\circ}C$; T_χ , T_Π и T_Γ – текущие температуры частицы, подложки и области границы во время их взаимодействия, $^{\circ}C$; t – время, с; $t_{1пл}$ – время достижения поверхностью частицы температуры плавления, с; V_K – относительное объемное содержание керамических включений в материале; X_{01} – радиус частицы, м; X_1 и $X_{1пл}$ – текущая глубина прогрева частицы и глубина ее прогрева в момент достижения поверхностью температуры плавления, м; X'_{01} – начальная толщина частицы в момент ее взаимодействия с подложкой, м; X_1 и X_2 – глубина охлажденного слоя частицы и прогретого слоя подложки во время их взаимодействия, м; x_1 и x_2 – координаты, отсчитываемые вглубь от ее поверхности частицы и подложки, м; z – толщина проплавленного слоя подложки, м; α_1 – коэффициент теплоотдачи от поверхности частицы, Вт/(m^2 ·град); γ_1 , γ_2 и γ'_2 – плотности материалов частицы, твердой и жидкой подложки, кг/ m^3 ; γ_K , γ_M и $\gamma_{эф}$ – плотности керамического материала, металла и их смеси, кг/ m^3 ; λ_1 , λ_2 и λ'_2 – коэффициенты теплопроводности материалов частицы, твердой и жидкой подложки, Вт/(м·град); λ_K , λ_M и $\lambda_{эф}$ – коэффициент теплопроводности керамического материала, металла и их смеси, Вт/(м·град). Индексы: ак – аккумуляция; г – граница; к – керамика; м – металл; п – подложка; пв – поверхность; пл – плавление; с – среда; т – теплопроводность; ч – частица; эф – эффективный; 0 – начальные значения величин; 1 – напыляемый материал; 2 – подложка.

Литература

1. Вейник А. И. Приближенный расчет процессов теплопроводности. Л.: Госэнергоиздат, 1959.
2. Получение покрытий высокотемпературным распылением/Под ред. Л. К. Дружинина и В. В. Кудинова. М.: Атомиздат, 1973.
3. Кудинов В. В. Плазменные покрытия. М.: Наука, 1977.
4. Вейник А. И. Теория затвердевания отливки. М.: Машгиз, 1960.
5. Белощенко Д. К. Явления переноса в жидких металлах и полупроводниках. М.: Наука, 1970.
6. Ван Фо Фы Г. А. Теория армирования материалов. Киев: Наукова думка, 1971.
7. Оделевский В. И. Расчет обобщенной проводимости гетерогенных систем // ЖТФ. 1951. Т. 21, вып. 6. С. 667–685.