

ДИНАМИКА ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ В ТЕХНОЛОГИЯХ ДЕТОНАЦИОННО – ГАЗОВОГО НАПЫЛЕНИЯ

В.Ю.Филимонов, К.Б.Кошелев, В.И.Яковлев

Применение технологий детонационно - газового напыления (ДГН) позволяет эффективно решить проблему получения защитных покрытий из композиционных материалов деталей и узлов машин ввиду того, что процесс ДГН характеризуется высокой скоростью дисперсного потока, до 1000 м/с, и температурами достигающими 3000 К [1]. Однако указанный метод является импульсным. В процессе нанесения покрытий происходит кристаллизация капель напыляемого компонента за время порядка $10^{-3} \div 10^{-4}$ с, толщина наносимого за один цикл слоя, составляет несколько микрометров, в объеме формирующегося слоя возможны фазовые превращения. Все это создает большие трудности экспериментального изучения динамики процессов образования покрытия в процессе ДГН. Следовательно, создание теоретической прогнозной модели, описывающей разогрев поверхности контакта основы для напыления, с напыляемым материалом, является актуальной задачей, поскольку температура контакта является главным динамическим параметром, определяющим адгезионные характеристики покрытия.

Развитые на сегодняшний день теоретические модели, относятся в основном к описанию одиночных актов взаимодействия расплавленных частиц с поверхностью основы [1,2], однако эти процессы не допускают прямой экспериментальной проверки, по этой причине, при моделировании, необходим иной подход к описанию указанных процессов, с точки зрения измеряемых макроскопических величин.

В настоящей работе проведено теоретическое исследование макрокинетики процессов разогрева поверхности основы для напыления с учетом возможных фазовых превращений.

При построении теоретической модели использовались следующие упрощающие предположения:

1. Основа для напыления является плоской, конечной толщины. Площадь торцевой поверхности значительно меньше площади поверхности напыления.

2. Поток напыляемых частиц ламинарный, распределение скорости в потоке отсутствует как по абсолютной величине, так и по направлению.

3. Скорость потока постоянна по времени и направлена нормально к поверхности основы. Рост напыляемого слоя происходит с постоянной скоростью.

4. Рост конвективного потока и его спад происходят мгновенно, через конечный интервал времени, циклично.

С учетом возможных фазовых превращений, распределение температуры в области напыляемой основы следует разбить на три характерных зоны (рис.1). Зона 1 ($z(t) < r < h(t)$) - напыляемый слой в жидкой фазе. Здесь $z(t)$ – граница зоны плавления – кристаллизация, $h(t)$ – внешняя граница поверхности напыления, скорость движения которой за интервал времени напыления постоянна, и определяется через скорость конвективного потока с использованием уравнения неразрывности ($\rho_1 V_1 = \rho^* V^*$). Зона 2 ($r_0 < r < z(t)$) - напыляемый слой в конденсированной фазе). Здесь r_0 – толщина основы. В случае $z = r_0$ – напыляемый слой полностью в жидкой фазе. В случае $z(t) = h(t)$ напыляемый слой полностью в конденсированной фазе. На границе r_0 – накладываются граничные условия четвертого рода для уравнения теплопроводности. На границе $z(t)$ накладываются граничные условия для поверхности плавления в режиме Стефана.

На границе $h(t)$ накладывается граничное условие второго рода для конвективного потока. На границе $r = 0$ накладывается граничное условие третьего рода (закон Ньютона - Рихмана). Система уравнений теплопроводности для областей в безразмерной форме запишется в виде (1):

ДИНАМИКА ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ В ТЕХНОЛОГИЯХ ДЕТОНАЦИОННО – ГАЗОВОГО НАПЫЛЕНИЯ

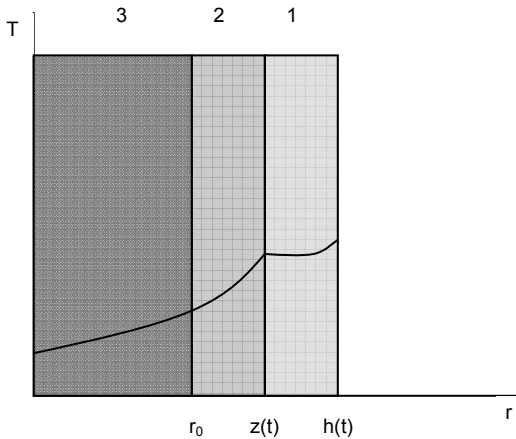


Рис.1. Схематическое распределение температуры в областях: 1 – жидкая фаза, 2 – напыляемый слой в конденсированной фазе, 3 – основа

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Theta_1}{\partial \tau} &= b_1 \frac{\partial^2 \Theta_1}{\partial x^2}; & \xi < x < y(\tau) \\ \frac{\partial \Theta_2}{\partial \tau} &= b_2 \frac{\partial^2 \Theta_2}{\partial x^2}; & 1 < x < \xi(\tau) \\ \frac{\partial \Theta_3}{\partial \tau} &= \frac{\partial^2 \Theta_3}{\partial x^2}; & 0 < x < 1 \end{aligned} \quad (1)$$

с набором граничных условий:

$$x = y(\tau), \quad \frac{\partial \Theta_1}{\partial x} = \beta_{12} (1 - \Theta_1)|_y, \quad \frac{dy}{d\tau} = uH, \quad x = \xi(\tau), \quad \Theta_1|_{\xi} = \Theta_2|_{\xi} = \Theta_l \quad (2)$$

$$x = 1, \quad \Theta_2|_1 = \Theta_3|_1, \quad \frac{\partial \Theta_2}{\partial x}|_1 = d_1 \frac{\partial \Theta_3}{\partial x}|_1 \quad (3)$$

$$\frac{d\xi}{d\tau} = \begin{cases} 0, \text{ при } \Theta_1|_1 \geq \Theta_l \\ u, \text{ при } \Theta_1|_1 \leq \Theta_l \\ \omega_{12} \left(\frac{\partial \Theta_2}{\partial \xi} \Big|_{\xi-0} - d_2 \frac{\partial \Theta_1}{\partial \xi} \Big|_{\xi+0} \right) \end{cases} \quad (4)$$

$$x = 0, \quad \frac{\partial \Theta_3}{\partial x} \Big|_0 = Bi \Theta_3 \Big|_0 \quad (5)$$

где $\Theta = \frac{T - T_0}{T^* - T_0}$, $\tau = \frac{a_1 t}{r_0^2}$, $x = \frac{r}{r_0}$, $\xi = \frac{z}{r_0}$,

$$y = \frac{h}{r_0}, \quad b_i = \frac{a_i}{a_3}, \quad b_2 = \frac{a_2}{a_3} \quad u = \frac{r_0}{a_3} V H$$

$$d_1 = \frac{\lambda_3}{\lambda_2}, \quad d_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

При начальных условиях:

$$\tau = 0, \quad \Theta = \begin{cases} 1, \text{ при } x \geq 1 \\ 0, \text{ при } 0 < x < 1 \end{cases} \quad (6)$$

$$\beta_{12} = \begin{cases} \beta_1 = \frac{c_p^* \rho^* V^* r_0}{\lambda_1}, \text{ при } \xi < y(\tau) \\ \beta_2 = \frac{c_p^* \rho^* V^* r_0}{\lambda_2}, \text{ при } \xi = y(\tau) \end{cases}$$

$$\omega_{12} = \begin{cases} \frac{\lambda_2 (T^* - T_0)}{a_3 \rho_1 L}, \text{ при } \xi < y(\tau) \\ \frac{\lambda_2 (T^* - T_0)}{a_3 \rho_2 L}, \text{ при } \xi = y(\tau) \end{cases}$$

Здесь T_0, T^* – температура окружающей среды и дисперсного потока соответственно, $a_{1-3}, T_{1-3}, \lambda_{1-3}$ – температуропроводность, температура и теплопроводность в соответствующих областях (рис.1), r – координата, t – время, r_0 – толщина основы, V – скорость роста внешней границы слоя h , c_p^*, ρ^* – удельная теплоемкость и плотность газодисперсного потока, ρ_1, ρ_2 – плотности жидкой и твердой фаз соответственно, L – удельная теплота плавления напыляемого порошка, H – обобщенная функция, вид которой представлен на рис.2:

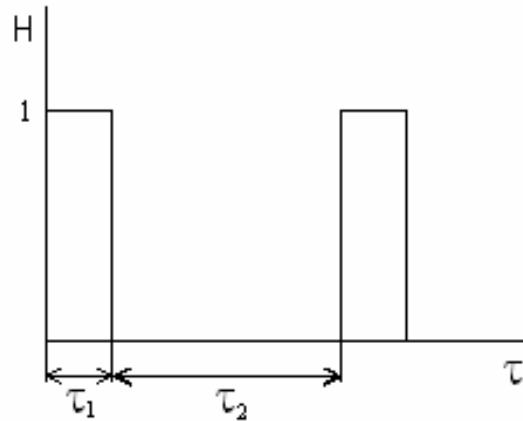


Рис.2. H – функция, используемая в модели: здесь t_1 – время взаимодействия струи с основой, t_2 – промежуток между циклами напыления

Двойной индекс обозначает то, что внешняя граница зоны 1 может находиться либо в конденсированной, либо в жидкой фазе.

Модель (1 - 6), аналогична модели, представленной в работе [2]. Однако автора-

ми [2] изучался процесс непрерывного (а не циклического) напыления для полубесконечной основы, без учета кинематических и теплофизических параметров газодисперсной струи.

Параметры b_i, d_i выбирались характерными для напыляемых на сталь металлов: $b_1 = 1,5, b_2 = 2, d_1 = 1,2, d_2 = 1,3$. Предполагалось $\rho_1 \approx \rho_2$ (расчет показывает, что отличие в плотностях на 20 – 30% не оказывает существенного влияния на значимые зависимости задачи). Параметры τ_1 и τ_2 фиксировались и выбирались характерными для процессов детонационного напыления: $\tau_1 = 10^{-3}, \tau_2 = 10^{-4}$. Параметр ω_{12} оказывает влияние лишь на скорость плавления в напыляемом слое, но не на закономерности разогрева поверхности за времена существенно большие длительности одного цикла. Варьируемыми являлись параметры β_{12}, Θ_i, Bi (Θ_i – безразмерная температура плавления напыляемого материала). Расчет проводился методами численного моделирования.

На рис.3 представлена характерная зависимость температуры напыляемой поверхности и координаты фронта плавления от времени при наличии фазового превращения в объеме слоя. Из графика следует, что термограмма носит осциллирующий характер. На амплитуду осцилляций оказывает влияние скважность импульсов напыления (время τ_2). В точке фазового превращения зависимость претерпевает излом, что связано с ощутимым различием параметров β_1, β_2 . Если значения указанных параметров близки, излом менее рельефный.

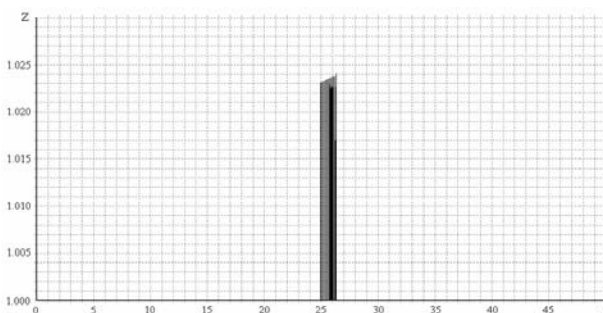
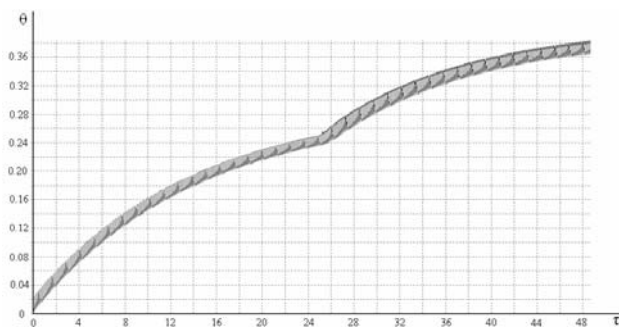


Рис.3. Зависимость обезразмеренной температуры Θ и координаты фронта плавления $z(\tau)$ от времени для значений: $\Theta_i = 0,25; \beta_1 = 0,16; \beta_2 = 0,05; Bi = 0,05$

На протяжении конечного промежутка времени, координата фронта плавления осциллирует с периодом, равным времени скважности. Длительность этого промежутка времени определяется временем нагрева поверхности до температуры плавления Θ_i , другими словами колебания фронта имеют место тогда, когда внешняя поверхность напыляемого слоя имеет температуру выше температуры плавления, а внутренняя ниже. После прогрева колебания исчезают, и далее напыляемый слой находится в жидкой фазе. Однако колебательный режим может иметь устойчивый характер при определенных значениях теплофизических параметров детонационной струи и основы. На рис.4 представлена диаграмма плавления на плоскости параметров $\beta - Bi$. Области ниже затемненных зон соответствуют твердофазному состоянию напыляемого слоя, область выше зон – жидкофазному. Промежуточные зоны – устойчивый колебательный режим плавления.

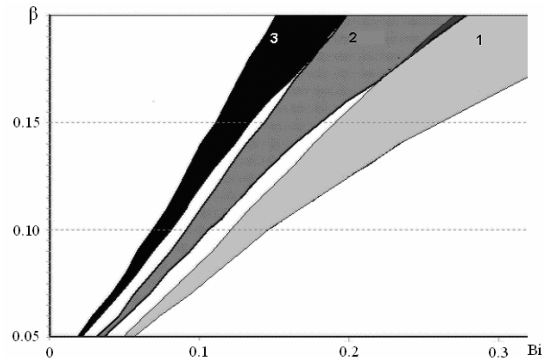
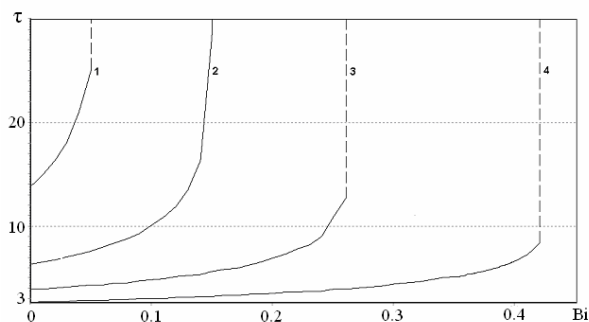


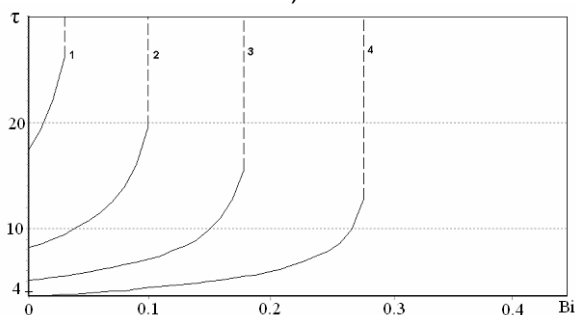
Рис.4. Диаграмма плавления на плоскости параметров $\beta - Bi$: 1 - $\Theta_i = 0,25$, 2 - $\Theta_i = 0,3$, 3 - $\Theta_i = 0,3$

ДИНАМИКА ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ В ТЕХНОЛОГИЯХ ДЕТОНАЦИОННО – ГАЗОВОГО НАПЫЛЕНИЯ

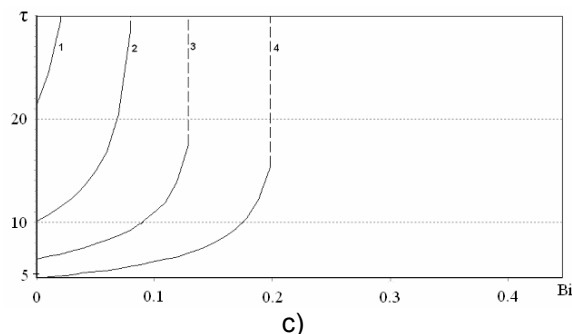
В случае если система находится в области параметров плавления (выше затемненных зон), закономерно встает вопрос о временах достижения точки плавления. На рис.5 представлены зависимости времени плавления от критерия Bi для различных значений Θ_l и β . На рисунке вертикальные линии иллюстрируют границы зон плавления (значения Bi, β при которых плавления не происходит, математически время плавления становится бесконечным). Монотонный рост зависимости $\tau(Bi)$ объясняется ростом времени достижения заданной температуры ликвидус с ростом теплоотвода. С другой стороны рост параметра β (кривые 1 – 4), при заданном Bi , уменьшает время плавления, т.к. при этом возрастает плотность теплового потока в момент соударения струи с основой, что ускоряет прогрев до температуры плавления и дает возможность достигнуть границы зоны плавления при большем теплоотводе.



a)



b)



c)

Рис.5. Зависимость безразмерного времени плавления от критерия Bi : а) $\Theta_l = 0,25$, б) $\Theta_l = 0,3$, в) $\Theta_l = 0,35$; 1 - $\beta = 0,05$, 2 - $\beta = 0,1$, 3 - $\beta = 0,15$, 4 - $\beta = 0,2$

Из приведенного анализа следует, что изменяя значения параметров дисперсной струи, или теплофизические характеристики основы можно добиться плавления напыляемого материала непосредственно на основе напыления, либо по заданным значениям указанных параметров прогнозировать возможность ликвации, при выполнении последней, прогнозировать время напыления до начала плавления, соответствующее количество циклов и толщину слоя нанесенного покрытия, при этом основными значимыми параметрами задачи для данного напыляемого материала являются: $\beta = c_p^* \rho^* V^* r_0 / \lambda$ (отношение конвективного теплопереноса на поверхность к кондуктивному теплопереносу в пластине) и $Bi = \alpha r_0 / \lambda$ (отношение внешнего теплового сопротивления пластины основы, к внутреннему).

ЛИТЕРАТУРА

1. Порошковая металлургия и напыленные покрытия. Под.ред. Б.С.Митина. М.: Металлургия, 1987.
2. Гавриленко Т.П., Николаев Ю.А., Прохоров Е.С., Ульяницкий В.Ю. О механизмах образования покрытий при газотермическом напылении. // Физ. гор. и взрыва, 1990, т.26, №2. – С.110 – 123.