

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КИНЕТИЧЕСКИХ И ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДИСПЕРСНОГО ПОТОКА В ПРОЦЕССЕ ДЕТОНАЦИОННО – ГАЗОВОГО НАПЫЛЕНИЯ

В.Ю.Филимонов, С.В.Терехин, А.А.Гладких, В.С.Черников, А.Е.Жакулова

Детонационно – газовое напыление (ДГН) является эффективной технологией нанесения защитных покрытий ответственных деталей механизмов и машин. Этот способ позволяет получать высококачественные, практически беспористые покрытия с высоким уровнем адгезии с материалом основы. С его помощью можно улучшить и даже полностью изменить поверхностные свойства деталей, получить заранее прогнозируемые свойства поверхности, с тем, чтобы наилучшим образом удовлетворить условиям эксплуатации деталей машин, приборов и механизмов. Характерной особенностью процесса ДГН, выгодно отличающей его от других способов нанесения покрытий, является высокая скорость газодисперсного потока (до 1000 м/с), и высокие температуры потока (до 2500⁰С) что позволяет формировать покрытия с высокими адгезионными характеристиками [1]. В качестве напыляемых материалов, в технологиях ДГН, как правило, используются двух или многокомпонентные композиционные порошки, синтезированные методом СВС, либо порошки, полученные методом плакирования [2].

Основной методологической проблемой технологий детонационного напыления, является контроль динамики разогрева поверхности основы в процессе нанесения покрытий. Для измерения температуры напыляемого слоя, чаще всего используются методы оптической пирометрии [3]. Однако в этом случае имеется возможность измерения температуры внешней поверхности слоя, в то время как внутренняя поверхность контакта основы с напыляемым материалом имеет другую температуру. Именно эта температура определяет адгезионные характеристики покрытия. Отсутствие необходимой экспериментальной методики вынуждает технологов выбирать оптимальные режимы напыления «вслепую», без использования прогнозных моделей. В настоящей работе предложена экспериментальная методика диагностики температуры поверхности основы, контактным методом, с использованием хромель –

алюмелиевых термопар. Для этого был сконструирован специальный датчик, чертеж которого представлен на рис.1. Во избежание электрического контакта термопар, основа разрезалась на две одинаковых части. Термопары основы крепились следующим образом. В первой половине разрезанной основы сверлилось сквозное отверстие диаметром 1,5 мм. В отверстие вставлялась термопара с диаметром спая 500 мкм, далее, с использованием точечной сварки, спай термопары приваривался к основе, после чего производилась шлифовка поверхности в месте сварки.

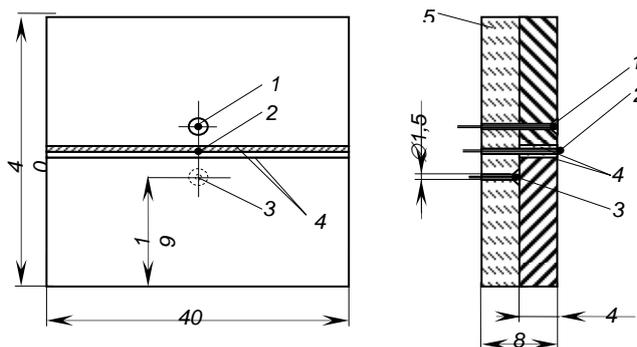


Рис. 1. Датчик для контроля температуры поверхностей основы напыления и температуры потока: 1 – термопара для контроля температуры внешней поверхности, 2 – термопара для контроля температуры потока, 3 – термопара для контроля температуры внутренней поверхности, 4 – слюдяные прокладки, 5 – асбестовая прокладка

Таким образом, полученный спай термопары имел среднюю толщину (выступал над внешней поверхностью основы) порядка 20 – 30 мкм и представлял собой «пятно» на внешней поверхности, диаметром 3 – 4 мм (1). Такая технология создания датчика температуры на внешней поверхности дает возможность анализировать быстропротекающие процессы изменения температуры, т.к. датчик является низкоинерционным. Во второй половине основы, с внутренней стороны, просверливалось отверстие диаметром 1,5 мм и глубиной 1 мм, далее спай термопары также приваривался к плоскости основы (3).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КИНЕТИЧЕСКИХ И ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДИСПЕРСНОГО ПОТОКА В ПРОЦЕССЕ ДЕТОНАЦИОННО – ГАЗОВОГО НАПЫЛЕНИЯ

Торцевые поверхности половин изолировались двумя слюдяными прокладками (4), толщиной 0,2 мм, между которыми зажималась третья термопара (2), предназначенная для контроля температуры потока. Спаи термопары выступали над поверхностью основы на 1,5 мм, таким образом была получена «воздушная» термопара, не имеющая контакта с основой. С внутренней стороны поверхности основы прикладывался слой асбокартона, толщиной 3мм, далее основа зажималась в тиски. Дистанция напыления (расстояние от среза ствола детонационной пушки до поверхности основы) составляла 10см (рис.2). Нанесение покрытия производилось с использованием установки «Катунь - М» для детонационно – газового напыления, оснащённую системой оптической экспресс – диагностики [4]. Сигналы с термопар через многоканальный аналого – цифровой преобразователь поступали на компьютер для дальнейшей обработки.

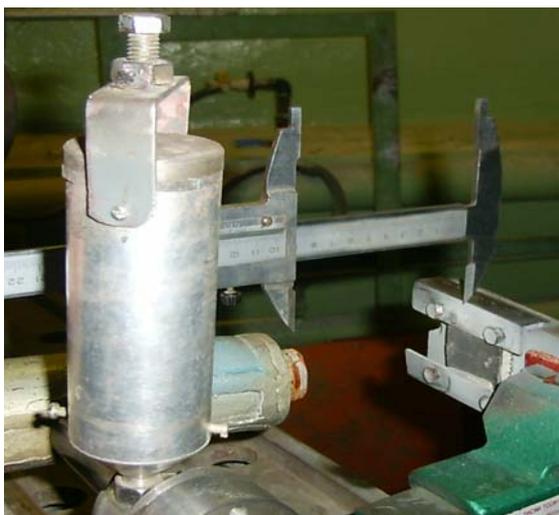


Рис.2. Внешний вид датчика для температурной диагностики процессов ДГН

Для напыления использовался порошок алюминия АСД -1 со средним размером 10мкм. На рис.3 представлены термограммы процесса ДГН с использованием вышеописанного микротермопарного датчика.

Продолжительность всего процесса напыления составляла $T = 180$ с, чему соответствовало 720 циклов. Интервал между циклами составлял $\Delta t = 0,25$ с.

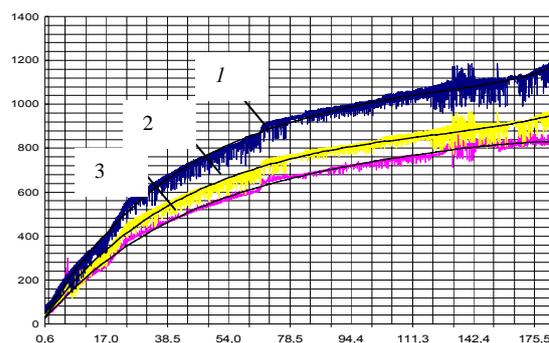


Рис.3. Термограммы процесса ДГН с использованием микротермопарного датчика: 1 – показания датчика контроля температуры потока, 2 – показания датчика контроля внешней поверхности основы, 3 – показания датчика внутренней поверхности основы. Сплошные линии – средние значения температуры

С использованием оптической экспресс – диагностики (времяпролетной методики) [4] было выяснено, что время взаимодействия материала с основой составляло $2 \cdot 10^{-3}$ с, при скорости газодисперсной струи 320 м/с. Процесс напыления прекращался в момент времени установления стационарных температур, который определяется прогревом области пространства между срезом детонационной пушки и поверхностью основы.

Как следует из рис. 3, амплитуда колебаний температуры, связанная с цикличностью процесса напыления, значительно меньше значения температуры поверхности основы в стационарном режиме, поэтому в первом приближении процесс напыления можно считать практически непрерывным, при этом динамика разогрева поверхности будет определяться кривой 2 (рис.3).

Из приведенных термограмм легко определить установившиеся температуры: $T_1 = 1160^\circ\text{C}$, $T_2 = 960^\circ\text{C}$, $T_3 = 850^\circ\text{C}$ (T_1 – температура потока, T_2 – температура внешней поверхности основы, T_3 – температура внутренней поверхности основы).

Для расчета параметров газодисперсной струи будем предполагать, что поток покрывает всю поверхность основы, скорость потока не имеет тангенциальной составляющей, распределение скоростей в сечении потока, параллельном поверхности основы, отсутствует. Исходя из этих соображений, поверхность основы нагревается тепловым конвективным потоком:

$$J^+ = c_p \rho v (T_1 - T_2) \quad (1)$$

где c_p, ρ, v – эффективные значения удельной теплоемкости, плотности и скорости потока соответственно. Прогрев основы за счет передачи кинетической энергии частицами потока, при измеренных скоростях, носит поправочный характер [3].

Теплоотвод с внутренней стороны основы определяется законом Ньютона – Рихмана:

$$J^- = \alpha (T_3 - T_\infty), \quad (2)$$

где α – эффективный коэффициент теплоотдачи, $T_\infty = 20^\circ \text{C}$ – температура окружающей среды.

При стационарном распределении температуры в пластине основы (в пренебрежении теплоотводом через торцы), распределение температур в основе толщиной r_0 будет иметь вид [5], представленный на рис. 4. Здесь $\beta = c_p \rho v r_0 / \lambda$ – отношение конвективного потока к кондуктивному, λ – теплопроводность материала основы, $Bi = \alpha r_0 / \lambda$ – критерий Био – отношение внешнего теплового сопротивления основы к внутреннему.

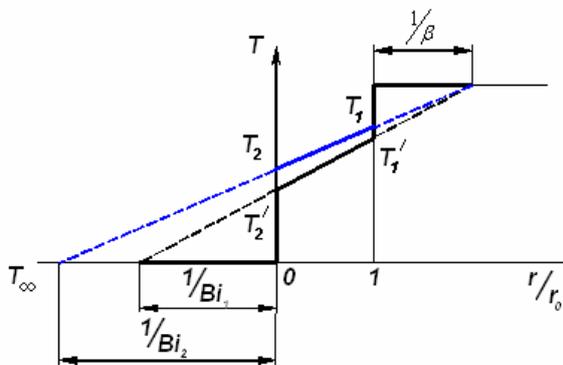


Рис.4. Схематическое распределение температуры по толщине основы при различной теплоизоляции ее внутренней поверхности ($Bi_1 > Bi_2$)

На рис. 4 представлены распределения температуры для различных значений критерия Био. Здесь T_1, T_1' и T_2, T_2' – температуры внешней и внутренней поверхности основы соответственно, при разных значениях критерия Био.

На основании данных эксперимента, находим: $Bi = (T_2 - T_3) / (T_3 - T_\infty) = 0,13$. В

стационарном случае должно выполняться равенство потоков (1), (2), что дает: $\beta = Bi (T_3 - T_\infty) / (T_1 - T_2) = 0,54$. Тогда по-

ток энергии на единицу поверхности основы, для значения теплопроводности стальной основы $\lambda = 48,7 \text{ Вт/мК}$ [6], будет равен:

$c_p \rho v (T_1 - T_2) = \beta \lambda / r_0 = 6,6 \text{ кВт/м}^2$, мощность теплового потока напыления на поверхность площадью S ,

$P = \beta \lambda S / r_0 = 10,6 \text{ Вт}$, соответственно количество вещества, переносимого на площадь S за единицу времени $\rho v S = P / [c_p (T_1 - T_2)]$

$= 45 \text{ мг/с}$, для значения удельной теплоемкости алюминиевых капелек $c_p = 1,18 \text{ кДж/кгК}$ [6]. Масса порошка,

осевшего на основе за время напыления $\Delta m = \rho v S T = 8 \text{ г}$. Взвешивание основы до и после напыления дало значение 6 г . Завышенное значение расчетной массы напыленного материала можно объяснить тем, что

измерение температуры потока производилось в геометрическом центре основы, т.е. в точке, где температура, плотность и скорость потока максимальна. При удалении от центра основы к периферии, значения указанных величин должны уменьшаться. В этом смысле произведение ρv , полученное по результатам измерения температур, необходимо понимать как усредненный по поверхности основы массовый поток, что и приводит к различию расчетных и измеренных масс.

Естественно предположить, что при удалении поверхности основы от среза ствола детонационной пушки, распределение массы напыленного материала по поверхности основы будет более соответствовать равномерному и различие между расчетной и измеренной массой будет уменьшаться.

ЛИТЕРАТУРА

1. Порошковая металлургия и напыленные покрытия. Под.ред. Митина Б.С. М.: Металлургия, 1987.
2. Кулик А.Я. Газотермическое напыление композиционных порошков. Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1985.
3. 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.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КИНЕТИЧЕСКИХ И
ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДИСПЕРСНОГО ПОТОКА В ПРОЦЕССЕ
ДЕТОНАЦИОННО – ГАЗОВОГО НАПЫЛЕНИЯ

4. Евстигнеев В.В., Яковлев В.И., Гуляев П.Ю., Шарлаев Е.В., Гладких А.П. Интегральная экспресс – диагностика параметров тепло – массопереноса твердой фазы в детонации. В сб. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез. Материалы и технологии. Под. ред В.В.Евстигнеева. Новосибирск: Наука 2001.

5. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М.: Энергия. 1975.

6. Зиновьев В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. Справочник. М.: Metallurgia. 1989.