

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАГРЕВА ЧАСТИЦ ПОРОШКОВОГО МАТЕРИАЛА ПРИ НАНЕСЕНИИ ПЛАЗМЕННЫХ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

В.И. Богданович, М.Г. Гиорбелидзе

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34, 443086

E-mail: [bogdanovich@ssau.ru](mailto:bogdanovich@ssau.ru); [m.giorbelidze@ssau.ru](mailto:m.giorbelidze@ssau.ru)

Для защиты и придания ответственным изделиям машиностроения необходимых свойств широкое распространение получил плазменный газотермический метод нанесения покрытий. Как показывает практический опыт [1-5], благодаря возможности использования широкой номенклатуры порошковых материалов и высокой технологичности метода, плазменные покрытия способны обеспечить высокую термостойкость, жаростойкость, эффективную защиту против высокотемпературной газовой коррозии, каплеударной эрозии материала и интенсивного износа контактирующих поверхностей. Однако, для того чтобы полностью использовать потенциальные свойства применяемых материалов необходимо разработать технологические режимы нанесения, учитывающие влияние основных физических процессов на качество и структуру получаемого покрытия. Одним из основополагающих при формировании плазменных покрытий является тепловой фактор [1,4,5,8-10], включающий нагрев и плавление частиц напыляемого материала в плазменном потоке.

Решение задачи нагрева и проплавления частиц порошкового материала является важной частью технологии, позволяющей управлять микроструктурой и свойствами формируемого покрытия. Данная задача относится к так называемой проблеме Стефана и из-за своей сложности имеет только приближенные решения, среди которых самым известным является решение Л.С. Лейбензона [6,7], которое активно используется и в настоящее время.

В работе представлена математическая модель нагрева частиц порошкового материала в газовом потоке при нанесении плазменных газотермических покрытий. Учитывалось, что при движении в плазме частица нагревается за счет механизмов конвективного теплообмена и теплообмена излучением. Для обеспечения точности и корректности расчета выделены две характерные области: ядро, в котором температура, плотность, вязкость плазмы и другие параметры считаются постоянными, а также область от ядра до напыляемой поверхности, в которой данные параметры являются функциями от координаты плазменного потока. В качестве допущений принято, что форма частиц близка к шарообразной, а тепловой поток действует на поверхность частицы равномерно. Особое внимание уделено корректному выбору значения критерия  $Bi$ , что позволило упростить решение и свести его к обыкновенному дифференциальному уравнению первого порядка, получаемому из уравнения баланса тепла в частице.

В работе представлено решение задачи, полученное методом дифференциальных рядов, которое показало, что используемые классические приближенные решения дают хорошее приближение только для начальной стадии плавления. В связи с этим, погрешности в определении полного времени расплавления частицы могут достигать сотен процентов.

Получено точное аналитическое решение для полного времени расплавления частицы при постоянной температуре, что соответствует участку ядра плазменного потока:

$$Fo_m = St(2 + Bi_p) / [6Bi_p(\theta'_r - 1)],$$

где  $Bi = \frac{\alpha R}{\lambda}$  – критерий Био;  $\alpha$  – коэффициент конвективного теплообмена,  $\lambda$  – коэффициент

теплопроводности;  $R$  – радиус частицы;  $\theta'_r = \frac{T_r}{T_m}$ ;  $T_m$  – температура плавления материала частицы;  $T_r$

– температура газа в плазменном потоке;  $St = \frac{L}{c_p T_m}$  – критерий Стефана;  $L$  – скрытая теплота фазового

перехода материала из твердой в жидкую фазу;  $c$  – удельная теплоемкость; индекс «р» в параметрах означает, что они отнесены к материалу в расплавленном состоянии.

В области за ядром плазменного потока из-за нелинейности задача нагрева частицы решалась в численной конечно-разностном виде.

Результаты численного моделирования определения температуры нагрева и степени проплавления напыляемых частиц различного диаметра показали, что в зависимости от режимов и грануляции напыляемого порошка термическое состояние частиц различного диаметра отличается существенно, что, несомненно, оказывает решающее влияние на формирование слоистой структуры плазменного газотермического покрытия. На основе результатов моделирования предложены рекомендации по назначению режимов нанесения покрытия.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барвинок В.А. Плазма в технологии, надежность, ресурс. – М.: Наука и технологии, 2005. – 456 с.
2. Бобров Г.В., Ильин А.А., Спектор В.С. Теория и технология формирования неорганических покрытий. – М.: Альфа-М, 2016. – 928 с.
3. Пузряков А.Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления. – М.: Издательство МГТУ, 2003. – 458 с.
4. Ильющенко А.Ф., Шевцов А.И., Оковитый В.А., Громько Г.Ф. Процессы формирования газотермических покрытий и их моделирование. – Минск: Беларус. навука, 2011. – 357 с.
5. Барвинок В.А., Богданович В.И., Докукина И.А. Математическое моделирование и физика процессов нанесения плазменных покрытий из композиционных плакированных порошков. – М.: Международный центр НТИ, 1998. – 96 с.
6. Карташев Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. – М.: Высшая школа, 2001. – 550 с.
7. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 600с.
8. Joshi S.V. Plasma spraying of Wc-Co part I. Theoretical investigation of particle heating and acceleration during spraying // Journal of Thermal Spray Technology. – 1993. – Vol. 2. – P. 127-131.
9. Bogdanovich V.I., Giorbelidze M.G. Mathematical simulation of surface heating during plasma spraying // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 177, Issue 1. – P. 1-7, article number 012057.
10. Bogdanovich V.I., Giorbelidze M.G. Metallographic Study of Mesostructure-Ordered Plasma Ceramic Coatings // Key Engineering Materials. – 2017. – Vol. 743. – P. 118-123.