

Разработка математической модели движения дисперсных частиц в плазменном потоке в области пограничного слоя при нанесении плазменных покрытий

В.И. Богданович¹, М.Г. Гиорбелидзе¹

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

Аннотация. В статье приведены результаты математического моделирования движения дисперсных частиц в плазменном потоке в области пограничного слоя при нанесении плазменных покрытий. Модель учитывает, что дисперсные частицы движутся по разным траекториям с различными скоростями, также учитывается изменение компонент скорости центра масс частиц в зоне пограничного слоя. Установлены значения углов, под которым частицы попадают и закрепляются на поверхности конденсации. Определены размеры частиц, увлекаемых потоком и не участвующих в образовании покрытия. Установлено, что величина диапазона размеров частиц, используемой фракции порошкового материала, и параметры плазменного потока оказывают существенное влияние на структуру плазменного покрытия и его прочность сцепления с поверхностью конструкционного материала.

1. Введение

В настоящее время для повышения надежности изделий в условиях внешних негативных факторов используются специальные покрытия, которые позволяют направленно изменять физико-химические свойства исходных поверхностей. Среди значительного количества разнообразных методов получения таких покрытий широкое распространение получил плазменный газотермический метод нанесения покрытий из порошковых материалов [1-11]. Наиболее широкое и экономически эффективное применение плазменного газотермического метода в ведущих зарубежных компаниях связано с двигателестроением, особенно с производством газовых турбин для получения теплозащитных и термобарьерных покрытий, где он выдержал конкуренцию и фактически вытеснил различные вакуумные методы получения таких покрытий благодаря ряду преимуществ [1-2,4].

К основным преимуществам плазменного газотермического метода можно отнести высокую технологичность и производительность, особенно при использовании современных систем автоматизированного проектирования CAD/CAE/CAM с робототехническими комплексами, возможность нанесения покрытий заданной толщины на сложно профилированные, в том числе, и внутренние поверхности. Ключевой особенностью таких покрытий является слоистая структура и расположение границ кристаллитов вдоль поверхности конструкционного материала, что способствует повышению стойкости к высокотемпературной газовой коррозии, окислению и термоциклированию. Такое строение плазменных покрытий принципиально отличается от структуры покрытий, полученных вакуумными электронно-лучевыми и ионно-

плазменными методами, в которых структура имеет столбчатый колоннообразный характер. Каждый отдельный столб структуры состоит из нескольких кристаллитов меньшего размера, направленных перпендикулярно поверхности основы. Границы между такими кристаллитами начинаются на поверхности покрытия и заканчиваются на поверхности основы. Наличие подобных вертикальных границ приводит к созданию каналов для проникновения ионов кислорода, вредных примесей и других химических элементов к защищаемым конструкционным материалам. Помимо этого, вертикальные границы столбов являются концентраторами напряжений и приводят к снижению предела выносливости деталей с покрытием по сравнению с деталями без покрытия.

Порошковые материалы, используемые для формирования плазменных покрытий, независимо от состава обладают достаточно широкой дисперсностью размеров, обусловленной физической природой их получения. Это приводит к тому, что при вводе в газовый поток частицы порошкового материала движутся не строго вдоль оси струи, а по отдельным траекториям с различными углами, скоростями и разными температурами нагрева. При попадании на напыляемую поверхность такие дисперсные частицы порошкового материала с отличающимся термическим и кинетическим состоянием образуют кристаллиты разных форм и размеров с различной степенью деформации при ударе и различной прочностью сцепления с поверхностью конструкционного материала. Исследования такой структуры на поперечных шлифах покрытий, полученных различными, в том числе и зарубежными производителями, показывают, что она состоит из дискообразных кластеров с различной степенью деформации и слабдеформированных сфероподобных частиц. Подобная структура характеризуется широкой анизотропией свойств и приводит к тому, что глобальное качество покрытия определяется качеством локальных объёмов структуры с наименьшими значениями физико-механических свойств и эксплуатационных характеристик.

Установление такой природы снижения эксплуатационных характеристик покрытия приводит к необходимости проведения комплексных исследований по достижению значительно более однородной и упорядоченной структуры. Достижение данного эффекта возможно за счет более детального исследования переноса частиц порошкового материала в плазменной струе при попадании на поверхность конденсации и разработки технологических рекомендаций на основе полученных результатов.

2. Постановка математической модели движения дисперсных частиц в плазменном потоке в области пограничного слоя при нанесении плазменных покрытий

Более точное описание процесса ускорения и транспортировки невозможно без анализа движения порошкового материала вблизи напыляемой поверхности и определении угла, под которым частицы попадают и закрепляются на поверхности защищаемой детали. При моделировании процессов ускорения и транспортировки частиц порошкового материала в большинстве работ [2-5,7] не учитывается, что плазменная струя состоит из ряда характерных участков, таких как область ядра с постоянными параметрами потока, область смешения и зона установившегося потока, где параметры плазмы являются переменными величинами, а также область пограничного слоя. Не учитывается, что в плазменном потоке частицы разного диаметра пребывают разное время и движутся по-разному, в результате при входе в зону пограничного слоя мелкодисперсные частицы имеют существенно отличающиеся скорости и траектории движения. В зоне пограничного слоя происходит изменение поля скоростей центра масс частиц и изменение траекторий, вызванное обтеканием потока напыляемой поверхности. Это приводит к уменьшению скоростей и ещё большему отклонению траекторий движения от оси струи. В результате этого на поверхность конденсации частицы попадают под разными углами. Закрепление частиц на поверхности вследствие неортогонального удара с меньшими скоростями неизбежно приводит к возникновению неупорядоченной структуры, состоящей из кластеров с разной степенью пластической деформации с малой величиной контактной площади и достаточно малым временем действия давления сжатия на контактирующих поверхностях, в течение которого не могут быть сформированы прочные связи. Реализация подобного механизма формирования покрытий способствует существенному снижению

адгезионной и когезионной прочности. Данный факт в большинстве работ также не описывается. Принимается серьезное допущение [2-5,7-9], при котором считается, что частица не зависимо от своего размера движется в центре струи и закрепляется на поверхности изделия вследствие ортогонального удара. Отсутствуют аналитические и экспериментальные данные по определению угла, под которым частицы попадают и закрепляются на напыляемой поверхности.

При постановке данной математической модели использовались свойства плазменного потока, натекающего на преграду, а также решение для толщины пограничного слоя при осесимметричном течении. Входными граничными условиями для данной задачи являются переменные параметры плазменной струи и параметры частицы на входе в зону пограничного слоя при переходе из области установившегося потока:

$$V_x \frac{dV_x}{dx} = \frac{3C_{0,x}\rho_f V^k}{4\rho D^{k+1}} (U_x - V_x)^{2-k}; \quad (1)$$

$$V_y \frac{dV_y}{dy} = \frac{3C_{0,y}\rho_f V^k}{4\rho D^{k+1}} (U_y - V_y)^{2-k}; \quad (2)$$

$$V_y(y_\delta) = V_{\delta,y}; \quad V_x(x_\delta) = V_{\delta,x}; \quad (3)$$

$$U_x = -ax; \quad U_y = ay; \quad (4)$$

$$\delta = 2,4\sqrt{v/a}, \quad (5)$$

где U_x и U_y – скорости плазменного потока в окрестности критической точки; x_δ ; y_δ и $V_{\delta,x}$; $V_{\delta,y}$ – координаты центра масс частицы и, соответственно, компоненты скорости центра масс частицы при входе в зону пограничного слоя; a – градиент скорости плазменного потока; δ – толщина пограничного слоя; v – кинематическая вязкость плазменного потока; ρ_f – плотность газа в потоке; $C_{0,x}$; $C_{0,y}$; k – параметры лобового сопротивления частицы при движении в плазменном потоке; ρ – плотность частицы порошкового материала; D – диаметр частицы порошкового материала.

3. Заключение

Проведены исследования процессов ускорения и транспортировки мелкодисперсных частиц напыляемого порошкового материала в плазменном потоке с учётом влияния пограничного слоя. Разработана математическая модель движения мелкодисперсных частиц в плазменном двухфазном потоке в области пограничного слоя. Определены траектории, компоненты скорости центра масс и углы, под которым частицы попадают и закрепляются на напыляемой поверхности. Установлены и описаны закономерности угла падения частиц на напыляемую поверхность в зависимости от свойств двухфазного плазменного потока и характеристик порошкового материала. Определены размеры частиц порошкового материала, увлекаемые потоком и не участвующие в формировании покрытия.

Прикладное применение полученных соотношений рассмотрено на примере материала $ZrO_2 - 8\%Y_2O_3$, использующегося для нанесения внешнего керамического слоя в теплозащитных покрытиях. Анализ результатов моделирования показал, что частицы разных диаметров попадают на поверхность основы под разным углом. Значительное влияние на угол падения начинает проявляться у частиц менее (25 – 30) мкм. Было установлено, что такие частицы попадают и закрепляются на поверхности основы под углом менее 45 градусов, что приводит к нарушению упорядоченной структуры и ухудшению защитных свойств покрытия, в частности, к снижению прочности сцепления покрытия с основой на (15 – 20) %. Также установлено, что частицы диаметром менее 10 мкм увлекаются набегающим потоком и не попадают на поверхность детали. Проведённый металлографический анализ порошкового материала $ZrO_2 - 8\%Y_2O_3$ широко используемой фракции дисперсностью 40 мкм и меньше показал, что более 68 % всех частиц данной фракции приходится на частицы с размерами менее

25 мкм, попадающие на поверхность основы под малым углом и приводящие к нарушению регулярной кластерной упорядоченности.

4. Литература

- [1] Барвинок, В.А. Плазма в технологии, надежность, ресурс / В.А.Барвинок. – М.: Наука и технологии, 2005. – 452 с.
- [2] Бобров, Г.В. Теория и технология формирования неорганических покрытий / Г.В. Бобров, А.А. Ильин, В.С. Спектор. – М.: Альфа-М, 2014. – 925 с.
- [3] Алхимов, А.П. Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика / А.П. Алхимов, С.В. Клинков, В.Ф. Косарев, В.М. Фомин. – М.: Физматлит, 2010. – 536 с.
- [4] Бобров, Г.В. Нанесение неорганических покрытий/ Г.В. Бобров, А.А. Ильин. – М.: Интернет-Инжиниринг, 2004. – 624 с.
- [5] Ильющенко, А.Ф. Процессы формирования газотермических покрытий и их моделирование / А.Ф. Ильющенко, А.И. Шевцов, В.А. Оковитый. – Минск: Беларус. Навука, 2011. – 357 с.
- [6] Каблов, Е.Н. Теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД / Е.Н. Каблов, С.А. Мубояджян // *Металлы*. – 2012. – №1. – С. 5-13.
- [7] Robert, V. Heimann. Plasma spray coating / V. Robert / Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft mbH. – 352 p.
- [8] Xianglin, Z. Numerical investigation of the rebounding and the deposition behavior of particles during cold spraying / Z. Xianglin, W. Xiangkun, W. Jianguo // *Acta Metall.* – 2011. – Vol. 24(1). – P. 43-53.
- [9] King, P.C. Relationship between particle size and deformation in the cold spray process / P.C. King, M. Jahedi // *Applied Surface Science*. – 2010. – Vol. 256. – P. 1735-1738.
- [10] Schlichting, K.W. Patent US 20080044662 A1 Thermal barrier coating with a plasma spray top layer / K.W. Schlichting, M.J. Maloney, D.A. Litton, M. Freling, J.G. Smeggil, D. Snow // Priority: 18 Aug 2006; Date of publication of application: 21 Feb 2008.
- [11] Маркин, К.Н. Патент 2534714 Российская Федерация, МПК C23C4/04. Способ получения эрозионностойких теплозащитных покрытий / К.Н. Маркин, Е.В. Солопов, М.А. Пильщик, В.В. Сайгин, Е.М. Полежаева, Г.Н. Тишина // Патентообладатель ФГУП «Научно-производственное объединение Техномаш»; заявлено 15.03.2013; опубликовано 20.09.2014.

Development of the disperse powder material motion mathematical model in the boundary layer of plasma flow during plasma spraying

V.I. Bogdanovich¹, M.G. Giorbelidze¹

¹Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

Abstract. In this paper, the results of developing a disperse powder material motion mathematical model in the boundary layer of plasma flow during plasma spraying are given. The model takes into account: the disperse particles move along different trajectories with different velocity, the change of mass center velocity components during boundary layer motion. It has been found angles value at which particles are brought and fixed on the surface of condensation. It has been defined particle size entrained by the flow and not involved in the formation of the coating. It has been found that the size of the particle size range used by the powder material fraction and plasma flow parameters have a significant impact on the plasma coating microstructure and its adhesion strength with the structural material surface.

Keywords: plasma thermal spraying, mathematical model, plasma flow, disperse particles, powder material, boundary layer, coating microstructure, adhesion strength.