

Математическое моделирование удара частицы о неподвижную поверхность при формировании порошковых 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 рассмотрен процесс ударного взаимодействия частицы порошкового материала с напыляемой поверхностью. Разработана математическая модель процесса пластической деформации частицы, находящейся в твердой фазе, в дискообразный кластер. Рассмотрено влияние скоростных и тепловых характеристик на степень пластической деформации частицы.

1. Введение

Исследование и анализ структуры плазменных покрытий показал [1-15], что из-за достаточно большого разброса по дисперсности напыляемого материала поток частиц с различными скоростями и температурой нагрева ударяется о неподвижную поверхность и за счёт образования химических связей на контактирующих поверхностях формирует дискообразные кластеры с различной степенью пластической деформации. Прочность такого закрепления, определяющая адгезионную и когезионную прочность всего покрытия, зависит от многих факторов, в том числе, от величины контактной площади дискообразного кластера, тесно связанной со степенью пластической трансформации частицы в дискообразный кластер, и времени действия давления сжатия на контактной поверхности [7]. Вопрос обеспечения высоких физико-механических свойств, в частности, высоких значений адгезионной прочности композиционных покрытий типа металл - керамика является одним из ключевых. Однако, не смотря на большую значимость, в отечественных и иностранных публикациях отсутствует теоретические и экспериментальные данные, описывающие зависимость степени деформации кластера от ключевых параметров процесса нанесения покрытия и ее влияния на прочность сцепления покрытия с конструкционным материалом.

2. Постановка физической и математической модели процесса удара порошковой частицы о неподвижную поверхность

При движении в газовом потоке частица порошкового материала приобретает ускорение и нагревается до определенных температур. В результате чего при подлете к напыляемой поверхности частицы имеют разные скорости и могут быть в разном тепловом состоянии: холодными, поверхность которых не достигла температуры плавления; полностью расплавленными и оплавленными на некоторую глубину. При ударе о неподвижную поверхность происходит деформация, в материале частицы возникают упругие и пластические волны сжатия. Возникший в процессе удара фронт пластической волны перемещается вверх,

разделяя материал частицы на упругую и упруго-деформированную области. Математическое представление такого процесса сопряжено с рядом трудностей, среди которых особенно выделяется проблема описания растекания материала пластически-деформированной зоны вдоль напыляемой поверхности. Однако, для разработки технологических режимов нанесения покрытия большой интерес представляет установление зависимости объема материала, перешедшего в пластическое состояние от таких основных параметров как скорость частицы при подлете к поверхности, температура нагрева и механические характеристики порошкового материала. Анализ литературных источников показывает [1-15], что отсутствуют модели, описывающие комплексное влияние теплового и кинетического факторов на деформацию частицы с последующим расчетом размеров упругой и пластически-деформированной зон образовавшегося при ударе кластера покрытия.

В данной работе и в цитируемых источниках принято допущение, что порошковые частицы имеют форму, близкую к сферической. Задача математического моделирования была представлена двумя взаимосвязанными задачами: для областей материала частицы перед и за фронтом пластической волны. После удара частицы о плоскую преграду напряжения на ее плоскости контакта достигают предела текучести материала σ_s , и плоский фронт пластической волны начинает распространяться от неподвижной преграды со скоростью $v_p(t)$, разделяя материал частицы на две области с упругой и пластической деформациями высотой $h(t)$ и $h_p(t)$. Считая, что упругая область движется с одинаковыми скоростями $v(t)$ в различных ее точках, получаем уравнение динамики движения этой области в виде:

$$\rho \frac{dv}{dt} = -\sigma_s f(h(t)); \quad v(0) = v_0; \quad (1)$$

$$f(h(t)) = \frac{S(h(t))}{V(h(t))}, \quad (2)$$

где $V(h(t))$ и $S(h(t))$ – объем этой области и ее площадь на фронте волны пластичности; ρ – плотность материала порошковой частицы.

Фактический размер этой области в направлении удара $h(t)$ изменяется за счет ее движения со скоростью $v(t)$ к преграде и встречного движения фронта пластической волны $v_p(t)$:

$$\frac{dh}{dt} = -(v + v_p); \quad \frac{dh_p}{dt} = v_p. \quad (3)$$

3. Заключение

Разработана математическая модель процесса пластической трансформации шарообразной частицы напыляемого материала в дискообразный кластер структуры покрытия при ударе об основу. Установлены закономерности такой деформации от скорости частиц, температуры их нагрева и свойств материала. Установлено, что объёмная степень деформации частиц, не зависит от формы и размеров частиц, а определяется только свойствами материала на стандартной деформационной зависимости деформация – напряжение и скоростью этих частиц.

4. Литература

- [1] Барвинок, В.А. Плазма в технологии, надежность, ресурс. – 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. Клиников, 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] Пузряков, А.Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления / А.Ф. Пузряков. – М.: Издательство МГТУ, 2003. – 458 с.
- [7] Барвинок, В.А. Физическое и математическое моделирование процесса формирования мезоструктурно-упорядоченных плазменных покрытий / В.А. Барвинок, В.И. Богданович // Журнал технической физики. – 2012. – Т. 82, № 52. – С. 105-112.
- [8] Алхимов, А.П. Особенности деформирования микрочастиц при ударе о твердую преграду / А.П. Алхимов, А.И. Гулидов, В.Ф. Косарев, Н.И. Нестерович // Прикладная механика и техническая физика. – 2000. – Т. 41, №1. – С. 2014-209.
- [9] Robert, B. Heimann. Plasma spray coating / B. Robert. – Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft mbH. – 352 p.
- [10] Zhou, X. Numerical investigation of the rebounding and the deposition behavior of particles during cold spraying / X. Zhou, X. Wu, J. Wang // Acta Metall. – 2011. – Vol. 24(1). – P. 43-53.
- [11] 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.
- [12] Fukanuma, H. Mathematical Modeling and Numerical Simulation of Splat Cooling in Plasma Spray Coatings / H. Fukanuma, R. Huang, Y. Tanaka, Y. Uesugi // Journal of Thermal Spray Technology. – 2009. – Vol. 18(5-6). – P. 965-974.
- [13] Alkhimov, A.P. Experimental study of deformation and attachment of microparticles to an obstacle upon high-rate impact / A.P. Alkhimov, S.V. Klinkov, V.F. Kosarev // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 2000. – Vol. 41(2). – P. 245-250.
- [14] Grujicic, M. Computational analysis of the interfacial bonding between feed-powder particles and the substrate in the cold-gas dynamic-spray process / M. Grujicic, J.R. Saylor, D.E. Beasley, W.S. DeRosset, D. Helfritsch // Applied Surface Science. – 2003. – № 219. – P. 211-227.
- [15] Klinkov, S.V. Cold spray deposition. Significance of particle impact phenomena / S.V. Klinkov, V.F. Kosarev, M. Rein // Aerospace Science and Technology. – 2005. – № 9. – P. 582-591.

Mathematical simulation of particle impact on a fixed surface in the formation of powder coatings

V.I. Bogdanovich¹, M.G. Giorbelidze¹

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

Abstract. The article considers the process of powder material particles impact interaction with the sprayed surface. A mathematical model of particle plastic deformation process in the solid phase into a disk-shaped cluster is developed. The influence of velocity and thermal characteristics on the degree of particle plastic deformation is considered.