

УДК 621.793: 536.24

## РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НАГРЕВА ПОВЕРХНОСТИ ИЗДЕЛИЯ В ПРОЦЕССЕ НАНЕСЕНИЯ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ

Гиорбелидзе М. Г., Богданович В. И.

Самарский национальный исследовательский университет  
имени академика С.П. Королёва, г. Самара

Создание перспективных авиационных газотурбинных двигателей и ракетных двигателей с более совершенными техническими характеристиками тесно связано с увеличением температуры газового потока, в результате чего к деталям горячего тракта турбины и камеры сгорания, сопла ракетных двигателей предъявляют всё более высокие требования. С учетом того, что потенциал современных жаропрочных материалов практически исчерпан, одним из самых эффективных способов снижения температурных нагрузок на поверхность конструкционного материала является применение специальных покрытий, обладающих высокими показателями по термостойкости, эрозионностойкости, жаростойкости и обеспечивающих эффективную защиту поверхности деталей от межкристаллитной высокотемпературной коррозии. Благодаря возможности сочетания высоких значений физико-механических и эксплуатационных свойств при формировании мезоупорядоченной структуры наиболее перспективными являются плазменные теплозащитные покрытия. Однако, в процессе нанесения таких покрытий поверхность конструкционного материала может подвергаться существенным тепловым воздействиям, в результате актуальным является вопрос распределения температур в системе покрытие – основа [1-10]. Анализ литературных источников свидетельствует об отсутствии математических моделей нагрева поверхности, учитывающих потери тепла на нагрев нижних слоёв покрытия, что очень важно при решении задач с быстро перемещающимися источниками тепла.

Используя методы математической физики, получено аналитическое решение задачи распределения температуры в системе покрытие – основа для различных тепловых источников в виде интегрального уравнения Вольтерры 2 рода [5-6]. На основе разработанной математической модели предложена методика расчёта теплонапряжённости в изделиях типа пластин в процессе нанесения и наращивания плазменных покрытий. Проведены экспериментальные исследования распределения температуры для системы покрытие – основа в зависимости от технологических параметров при разной продолжительности процесса напыления на образцы с зачеканенной хромель-алюмелевой термопарой. Результаты сравнения аналитических и экспериментальных данных подтверждают применимость и адекватность разработанной математической модели расчёта нагрева поверхности при плазменном напылении. Незначительные расхождения расчётных данных с экспериментальными связаны с инертностью термопарного датчика. Из анализа полученных данных определен дополнительный параметр, позволяющий регулировать нагрев порошкового материала при формировании покрытия.

### Библиографический список

1. Барвинок, В.А. Плазма в технологии, надежность, ресурс [текст] / В.А. Барвинок. – М.: Наука и технологии, 2005. – 456 с.
2. Кудинов, В.В. Нанесение плазмой тугоплавких покрытий [текст] / В.В. Кудинов, В.М. Иванов. – М.: Машиностроение, 1981. – 192 с.

3. Barvinok, V.A. Nonstationary problem of heat conduction with arbitrary moving boundary [текст] / V.A. Barvinok, V.I. Bogdanovich // Power engineering New York. – 1982. – Vol. 20. – Issue 6. – P. 101 – 108.
4. Barvinok, V.A. On the heat conduction of two associated bodies with moving boundary [текст] / V.A. Barvinok., V.I. Bogdanovich // Power engineering New York. – 1982. – Vol. 20. – Issue 2. – P. 160 – 166.
5. Bogdanovich, V.I. Mathematical simulation of surface heating during plasma spraying [текст] / V.I. Bogdanovich, M.G. Giorbelidze // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 177. – article number 012057
6. Богданович, В.И. Математическое моделирование нагрева поверхности при плазменном напылении [текст] / В.И. Богданович., Е.В. Еськина, М.Г. Гиорбелидзе, К.В. Небога, Е.А. Зотов // Международный журнал «Проблемы машиностроения и автоматизации» – 2016. – №2. – С. 22-31.
7. Zhang, T. Computer modelling of the influence of process parameters on the heating and acceleration of particles during plasma spraying [текст] / T. Zhang, D.T. Gawne, B. Liu // Surface and Coatings Technology. – 2000. – Vol. 132, Issue 2. – P. 233 – 243.
8. Isakaev, E.K. Investigation of heating and acceleration of particles in plasma spraying [текст] / E.K. Isakaev, V.B. Mordynskii, A.S. Tyuftyayev, V.N. Senchenko, V.F. Chinnov, V.V. Shcherbakov // Welding International. – 2013. – Vol. 27, Issue 4. – P. 304 – 310.
9. Joshi, S.V. Plasma spraying of Wc-Co part I. Theoretical investigation of particle heating and acceleration during spraying [текст] / S.V. Joshi // Journal of Thermal Spray Technology. – 1993. – Vol. 2. – P. 127 – 131.
10. Doltsinis, I.St. Numerical analysis of plasma-sprayed ceramic coatings for high-temperature applications [текст] / I.St. Doltsinis, K.-U. Haller, R. Handel // Structural Engineering and Mechanics. – 1996. – Vol. 4. – Issue 6. – P. 679 – 702.