

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СФЕРИЧЕСКОЙ ЧАСТИЦЫ ПОРОШКА ПРИ НАНЕСЕНИИ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ДЕТАЛИ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Полянская Л.В., Абалихина О.В.

Самарский университет, г. Самара, Polyanskaya-lyudmila@list.ru

Ключевые слова: ракетный двигатель, теплозащитное покрытие, плазменное напыление, частица порошкового материала.

Ракетный двигатель является сложным техническим объектом и из-за высоких температур сгорания топлива требует применения системы из особых жаростойких материалов и теплозащитных покрытий [1-15]. Наиболее эффективным методом получения теплозащитных покрытий является плазменный газотермический метод [2-6, 10, 13-15]. При получении таких покрытий на камере сгорания ракетного двигателя приходится учитывать большое количество факторов [7-11, 13-14], среди которых особо следует выделить температуру частиц [13]. Необходимость решения задачи нагрева и плавления сферических частиц также возникает при разработке технологических режимов в технологии 3D-печати [12], в порошковой металлургии и при решении ряда других прикладных задач [1-3]. 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 (1931 г.), которое активно используется и в настоящее время.

В работе представлено решение задачи, полученное методом дифференциальных рядов, которое показало, что используемые 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.

Установлено, что полное время расплавления шаровой частицы, например, при постоянной температуре внешней среды, определяется соотношением:

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

где $Bi = \alpha R / \lambda$ – критерий Био; α – коэффициент конвективного теплообмена, λ – коэффициент теплопроводности; R – радиус частицы; $\theta'_r = T_r / T_m$; T_m – температура плавления материала частицы; T_r – температура источника нагрева; $St = L / c_p T_m$ – критерий Стефана; L – скрытая теплота фазового перехода материала из твердой в жидкую фазу; индекс « p » в параметрах означает, что они отнесены к расплавленному состоянию.

Полученные результаты позволяют решать задачи нагрева и проплавления частиц порошкового материала в плазменной струе при нанесении газотермических покрытий, а также при лазерном плавлении частиц в технологиях 3D-печати.

Список литературы

1. Барвинок В.А., Богданович В.И., Дементьев С.Г. и др. Современные технологии в авиа- и ракетостроении: учебник для студентов высших учебных заведений / Под ред. чл.-корр. РАН В.А. Барвинка. М.: Машиностроение, 2014. 402 с.
2. Барвинок В.А. Плазма в технологии, надежность, ресурс. М.: Наука и технологии, 2005. 456 с.
3. Бобров Г.В., Ильин А.А., Спектор В.С. Теория и технология формирования неорганических покрытий. М.: Альфа-М, 2014. 925 с.
4. Хокинг, М. Металлические и керамические покрытия / М. Хокинг, В. Васантасри, П. Сидки. М.: Мир, 2000. 518 с.
5. Пузряков А.Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления. М.: Издательство МГТУ, 2003. 458 с.

6. Bogdanovich V.I., Giorbelidze M.G. Main problems of mathematical modeling high energies plasma technologies // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 795. Article number 012004.
7. Гиорбелидзе М.Г., Христосова В.Ю. Анализ результатов численного моделирования ударной деформации частиц при нанесении порошковых покрытий // Инженерный журнал: наука и инновации. 2019. №2(98). С.77-79.
8. Bogdanovich V.I., Giorbelidze M.G. Development of mathematical model of disperse particle motion in the plasma flow in the field of boundary layer during plasma spraying // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1096(1). Article number 012190.
9. Bogdanovich V.I., Giorbelidze M.G. Calculation of residual stresses in plasma spray coatings taking into account the build-up process // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1368(4). Article number 042079.
10. Bogdanovich V.I., Giorbelidze M.G. Mathematical simulation of particle impact on a fixed surface in the formation of powder coatings // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1368(4). Article number 042078.
11. Bogdanovich V.I., Giorbelidze M.G. Determination of residual stresses in multi-layer plasma coatings // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 511. Article number 12005.
12. Bogdanovich V.I., Giorbelidze M.G. Numerical investigation of the thermal transformation of composition powder particles in the technology of selective laser melting // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 510. Article number 012005.
13. Bogdanovich V.I., Giorbelidze M.G. Mathematical Model of Powder Material Particles Heating in Thermal Spraying // Key Engineering Materials. 2018. Vol. 769. P. 336-345.
14. Bogdanovich V.I., Giorbelidze M.G. Mathematical modelling of powder material motion and transportation in high-temperature flow core during plasma coatings application // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 327. Article number 022036.
15. Bogdanovich V.I., Giorbelidze M.G. Analysis of the ceramic layer microstructure influence on plasma spray thermal barrier coating performance // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 286. Article number 012008.

Сведения об авторах

Полянская Людмила Витальевна, магистрант кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении, группа 3228-240404 D, инженер АО РКЦ «Прогресс». Область научных интересов: технологии производства авиационной и ракетно-космической техники, защитные покрытия.

Абалихина Оксана Васильевна, магистрант кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении, группа 3228-240404 D, инженер АО РКЦ «Прогресс». Область научных интересов: технологии производства авиационной и ракетно-космической техники, защитные покрытия.

SIMULATION OF THE THERMAL STATE OF A SPHERICAL POWDER PARTICLE WHEN APPLYING PLASMA COATINGS TO ROCKET ENGINE PARTS

Polyanskaya L.V., Abalikhina O.V.

Samara National Research University, Samara, Russia, Polyanskaya-lyudmila@list.ru

Keywords: rocket engine, heat shield coating, plasma spraying, powder material particle.

The rocket engine is a complex technical object and, due to the high combustion temperatures of the fuel, requires the use of a system made of special heat-resistant materials and heat-protective coatings. The most effective method for obtaining heat-protective coatings is the plasma gas-thermal method. When obtaining such coatings on the combustion chamber of a rocket engine, a large number of factors must be taken into account, among which the temperature of the particles should be particularly highlighted. In this paper, a solution to the problem of heating and melting a spherical powder particle is obtained and the time required for the complete melting of such a particle at a constant temperature of the medium is established. The obtained result can be used in the technology of applying plasma coatings and in the laser melting of particles in 3D printing technologies.