

УДК 621.793.7

К. А. ДАНЬКО

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИЗМЕНЕНИЯ СКОРОСТИ И ТЕМПЕРАТУРЫ ЧАСТИЦ Cr_3C_2 ПРИ СВЕРХЗВУКОВОМ ГАЗОПЛАМЕННОМ НАПЫЛЕНИИ ПОКРЫТИЙ ДВУХКАМЕРНОЙ ГОРЕЛКОЙ

Приведена математическая модель, описывающая изменения скорости и температуры частиц напыляемого материала в тракте двухкамерной горелки для сверхзвукового газопламенного напыления и от среза камеры смешения горелки до подложки. В качестве компонентов топлива в расчетах приняты МАФ-газ и кислород. Расчёты температуры и скорости частиц выполнены для карбида хрома размером 40 мкм. Полученные результаты показывают, что благодаря оригинальной конструкции горелки существенно улучшаются условия для тепловой релаксации напыляемого материала, а также расширяются возможности управления процессом напыления.

Ключевые слова: сверхзвуковое газопламенное напыление, двухкамерная горелка, карбид хрома, математическая модель, коэффициент лобового сопротивления, эжектор, число Рейнольдса, подложка.

Введение

На сегодняшний день, производство современного авиационного двигателя, отвечающего требованиям, предъявляемым к двигателям 5-го поколения, эксплуатацию тяжело нагруженного металлургического оборудования, оборудования химической промышленности и автомобилестроения сложно представить без технологии газотермического напыления функциональных покрытий. Сверхзвуковое газопламенное напыление порошковых покрытий занимает ведущую позицию в семействе методов газотермического напыления благодаря широкой номенклатуре материалов покрытий и высоким эксплуатационным характеристикам напылённых деталей.

Возможность управлять скоростью и температурой частиц напыляемых материалов в процессе напыления – принципиальный, с точки зрения качества покрытий, вопрос. Даже незначительные отклонения энергетических параметров частиц от диапазона оптимальных скоростей и температур может стать причиной получения некачественных покрытий. Причинами могут быть несоответствующие скорости частиц в момент их соударения с подложкой, слишком низкая или слишком высокая температура частиц, приводящая к ухудшению прочности их сцепления с подложкой или изменению химического состава покрытия вследствие их

перегрева, соответственно. Поэтому проблему управления энергетическими параметрами частиц решают как конструкторы оборудования для газотермического напыления, так и технологи, целью которых является получение заданных свойств функциональных покрытий [1 – 5].

Цель данной статьи состоит в создании математической модели движения частиц напыляемого материала от начала тракта двухкамерной горелки и до подложки. Для достижения этой цели вначале должна быть описана модель движения продуктов сгорания за пределами горелки и на основании результатов, полученных в [6], разработана обобщающая модель, позволяющая прогнозировать скорость и температуру частиц напыляемого материала.

Модель движения газового потока на выходе из эжектора

В статье [6] была детально описана модель изменения скорости и температуры продуктов сгорания внутри двухкамерной горелки. Для описания движения частиц напыляемого материала от входа в горелку и до подложки, сначала необходимо описать движение газового потока на участке с момента выхода из эжектора до подложки. В качестве базовой модели была использована модель, описанная в [7, 11, 12] и проиллюстрирована схемой на рисунке 1.

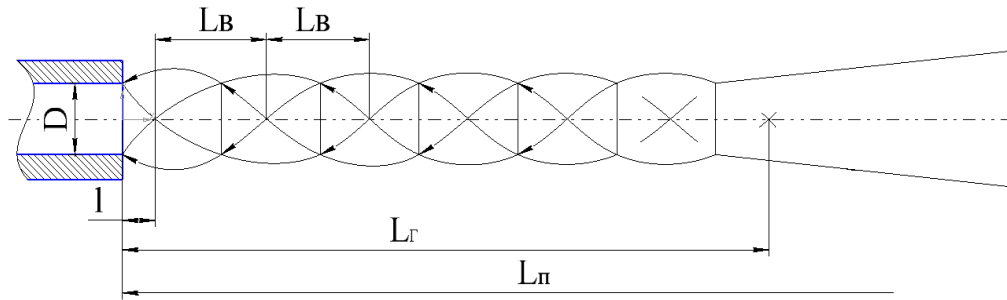


Рис. 1. Иллюстрация модели движения газового потока на выходе из эжектора

На этой схеме $L_Г$ – длина газодинамического участка – от среза сопла до перехода в дозвуковое течение (согласно [11], для чисел Маха от 1 до 3, $L_Г = 1+6L_B$); L_B – длина периодической структуры (волны); l – положение точки отражения падающего скачка уплотнения; $L_П$ – расстояние от среза сопла до подложки; $L_{ДЗ}$ – длина участка дозвукового течения струи; D – диаметр сопла.

Модель течения содержит следующие участки:

а) газодинамический сверхзвуковой участок струи $L_Г$, на котором скорость $v_{Г,сз}$ и температуру $T_{Г,сз}$ газа принимают постоянными;

б) участок дозвукового течения струи к подложке, его длина $L_{ДЗ} = L_П - L_Г$.

Последующие расчёты выполнены по методике [7]. $L_Г$ является функцией числа Маха для газового потока на срезе сопла M_0 и диаметра сопла D :

$$L_Г = D(4,2 + 1,1M_0^2). \quad (1)$$

Для выходного диаметра $D = 38$ мм и числа Маха

$$M_0 = \frac{w}{a} = \frac{w}{\sqrt{kRT}}, \quad (2)$$

получим $M_0 = 1,206$, $L_Г = 0,220$ (м).

Скорость и температуру газового потока на газодинамическом участке струи можем считать постоянными [7]. За пределами этого участка значения температуры и скорости газа, вследствие увеличения интенсивности взаимодействия с окружающим воздухом, начинают изменяться существенно. Изменение скорости и температуры газового потока за срезом сопла могут быть описаны с достаточной высокой точностью эмпирическими соотношениями (3) и (4)[7]:

$$\frac{v}{v_0} = 1 - \exp\left(\frac{\alpha}{1 - x/L_{НУ}}\right), \quad (3)$$

$$\frac{T - T_{окр.}}{T_0 - T_{окр.}} = 1 - \exp\left(\frac{\beta}{1 - x/L_{НУ}}\right), \quad (4)$$

где x – расстояние по оси струи от среза камеры смешения эжектора; α и β – экспериментальные коэффициенты (в данных расчётах можно принять $\alpha = 0,85$, $\beta = 1,25$ [7]).

Результаты расчётов представлены в виде графиков на рисунке 2.

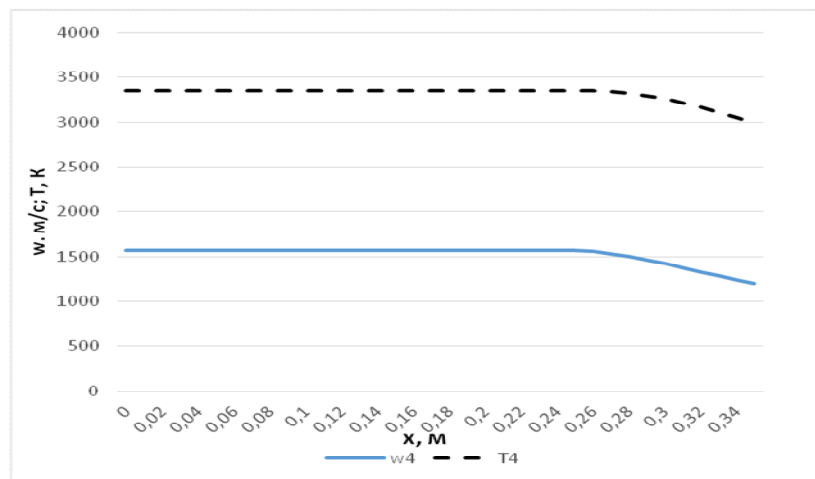


Рис. 2. Изменение скорости и температуры газового потока от среза камеры смешения эжектора до подложки

Сплошной линией обозначено изменение скорости газового потока за пределами камеры смешения, штриховой – изменение температуры. На графике видно падение скорости и температуры газового потока за пределами газодинамического участка.

Таким образом, при обобщении полученных результатов получаем графики изменения скорости и температуры газового потока от входа в горелку до подложки, представленные на рисунке 3. На графике штриховой линией обозначена температура газового потока, а сплошной – изменение его скорости. Скачки параметров соответствуют второму узлу подвода топлива и выходу в камеру смешения.

Модель разгона и нагрева частиц газовым потоком

Детально модель рассмотрена в работах [7...12]. Методика заключается в последовательном определении скорости, и температуры частиц.

Ускорение частицы напыляемого материала, движущейся в двухфазном потоке описывается следующими уравнениями (5)...(7) [7]:

$$m_{\text{ч}} \frac{dv_{\text{ч}}}{dt} = \frac{1}{2} C_x \rho_{\text{г}} A_{\text{ч}} (v_{\text{г}} - v_{\text{ч}}) |v_{\text{г}} - v_{\text{ч}}|, \quad (5)$$

где $m_{\text{ч}}$, $v_{\text{ч}}$ – масса и скорость частицы соответственно; C_x – коэффициент лобового сопротивления частицы; $v_{\text{г}}$ и $\rho_{\text{г}}$ – скорость и плотность газа соответственно; $A_{\text{ч}}$ – площадь проекции частицы на плоскость, перпендикулярную направлению вектора скорости потока.

После несложной подстановки $\frac{dv}{dt} = \frac{dv}{dx} \cdot v$ и $m_{\text{ч}} = \frac{\pi d_{\text{ч}}^3 \rho_{\text{ч}}}{6}$ получаем уравнение (6):

$$\frac{d}{dx} \cdot v_{\text{ч}} = \frac{3C_x \rho_{\text{г}} (v_{\text{г}} - v_{\text{ч}}) |v_{\text{г}} - v_{\text{ч}}|}{4\rho_{\text{ч}} d_{\text{ч}} v_{\text{ч}}}. \quad (6)$$

Причём:

$$C_x = \begin{cases} 24 / Re, & \text{при } Re < 0,5; \\ 24 / Re + (1 + 0,15 Re^{0,687}), & \text{при } 0,5 \leq Re < 1000; \\ 0,44, & \text{при } Re > 1000. \end{cases} \quad (7)$$

В последующих расчётах принимается предположение, что число Рейнольдса определяется на интервале $0,5 \leq Re < 1000$ и рассчитывается по формуле (8):

$$Re = \frac{d_{\text{ч}} \rho_{\text{г}} |v_{\text{г}} - v_{\text{ч}}|}{\eta_{\text{г}}}. \quad (8)$$

Решение дифференциального уравнения выполнено в пакете Mathcad для частиц Cr_3C_2 диаметром 40 мкм. Решение представлено в виде графика на рисунке 4. Сплошной линией показано изменение скорости продуктов сгорания, а штриховой – скорости частиц Cr_3C_2 . Благодаря инерционности частицы, график изменения их скорости не имеет резких скачков как график скорости продуктов сгорания. Это способствует постепенному увеличению их скорости от момента поступления в горелку и до самой подложки.

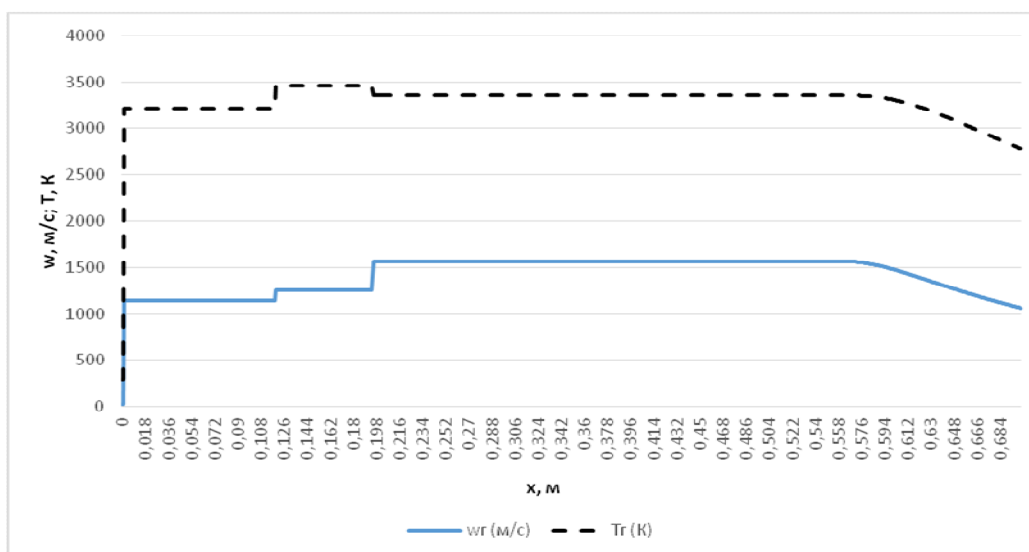


Рис. 3. Изменение скорости и температуры газового потока от входа в сопло до подложки

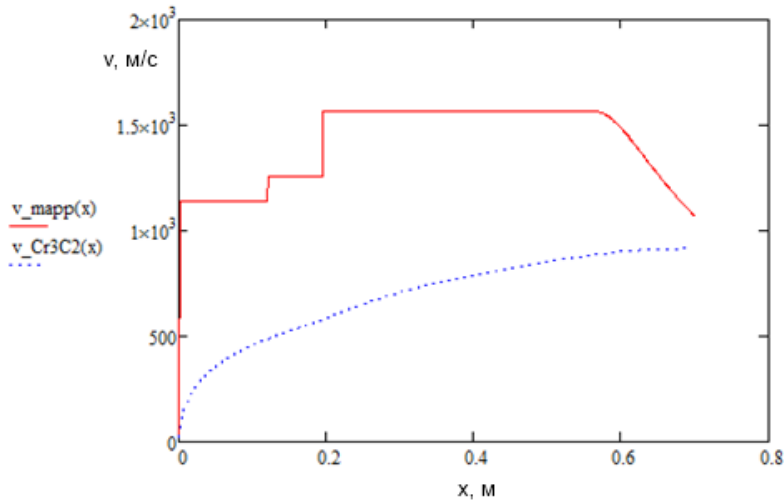


Рис. 4. График изменения скорости частиц Cr_3C_2 от входа в горелку и до подложки

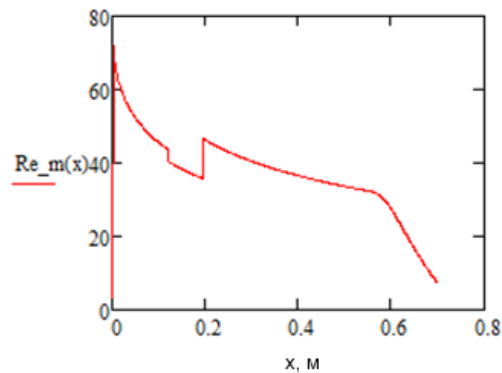


Рис. 5. График изменения числа Рейнольдса

На рисунке 5 показан график изменения числа Рейнольдса в ходе расчётов.

Очевидно, что предположение $0,5 \leq Re < 1000$ оказалось оправданным.

Расчёт температуры нагрева частиц газовым потоком выполнен согласно уравнению (9):

$$m_{\text{ч}} \frac{d}{d\tau} H_{\text{уд.ч}} = \alpha (T_{\Gamma} - T_{\text{ч}}) \pi d_{\text{ч}}^2. \quad (9)$$

И его составляющих (10)...(13):

$$m_{\text{ч}} = \frac{\pi d_{\text{ч}}^3 \rho_{\text{ч}}}{6}; \quad (10)$$

$$dH_{\text{уд.ч}} = C_{\text{ч}} dT_{\text{ч}}, \quad (11)$$

$$\alpha = \frac{\lambda_{\Gamma}}{d_{\text{ч}}} \left(2 + 0,6 Re^{1/2} Pr^{1/3} \right), \quad (12)$$

$$Pr = \frac{c_{p\Gamma} \eta_{\Gamma}}{\lambda_{\Gamma}}. \quad (13)$$

После подстановок получаем уравнение (14):

$$\frac{d}{dx} T_{\text{ч}} = \frac{6\alpha (T_{\Gamma} - T_{\text{ч}})}{\nu_{\text{ч}} C_{\text{ч}} \rho_{\text{ч}} d_{\text{ч}}}. \quad (14)$$

Согласно [13] удельная теплоёмкость материала частицы также является функцией от температуры (15):

$$c_{p Cr_3C_2} = 109,58 + 39,66 \cdot 10^{-3} T - 19,748 \cdot 10^{-5} T^2 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}. \quad (15)$$

Решение дифференциального уравнения выполнено в пакете Mathcad и представлено в виде графика на рисунке 6.

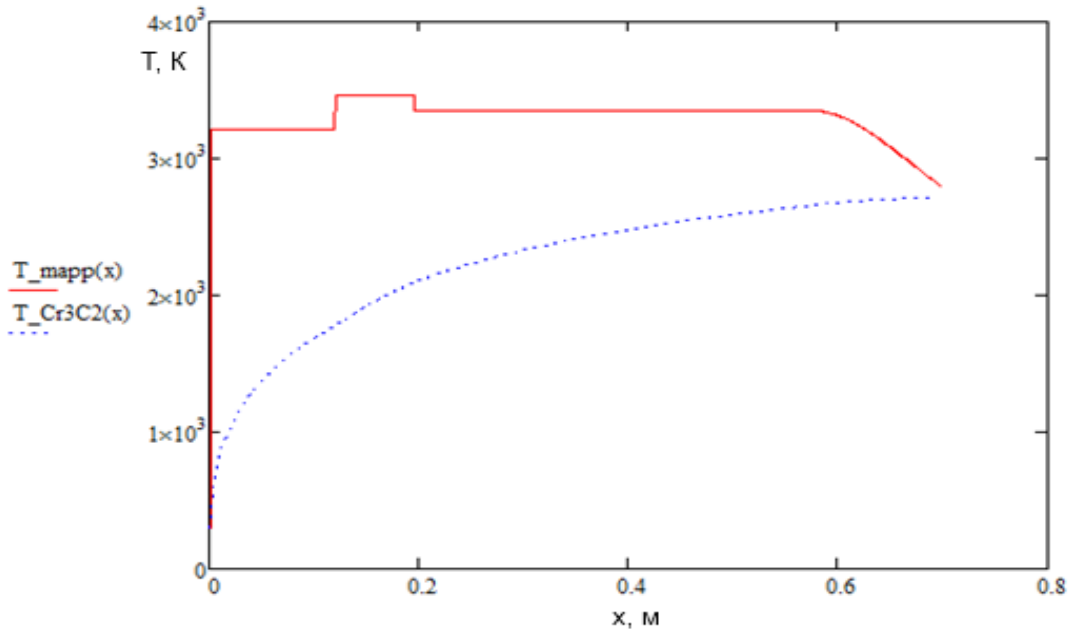


Рис. 6. Изменение температуры газопотока и частиц Cr_3C_2 от входа в горелку и до подложки

Из рисунка видно, что инерционность частиц проявляет себя на графике изменения температуры аналогично графику изменения скорости частиц и продуктов сгорания. Температура непрерывно и равномерно растёт от момента попадания частиц в тракт горелки до момента взаимодействия с подложкой.

Выводы

Создана математическая модель, описывающая динамику изменения скорости и температуры частиц напыляемого материала при сверхзвуковом газопламенном напылении с помощью двухкамерной горелки оригинальной конструкции. Исследование проводилось для МАФ-газа в качестве горючего и кислорода, в качестве окислителя. Напыляемым материалом служили – частицы Cr_3C_2 диаметром 40 мкм.

Разработанная в [6] и в данной работе модель позволяет определить скорость и температуру частиц напыляемого материала в любой момент от входа в горелку и до подложки и является полезным инструментом для исследователей и технологов, занимающихся вопросами усовершенствования функциональных газотермических покрытий.

Дальнейшая работа будет проводиться в направлении разработки практических рекомендаций, направленных на улучшение эксплуатационных характеристик деталей авиационной техники и других ответственных деталей, путём нанесения газотермических покрытий, в том числе описанной в работе горелкой.

Литература

1. *The 2016 Thermal Spray Roadmap [Text] / Armelle Vardelle, Christian Moreau, Jun Akedo et al. // Journal of Thermal Spray Technology. – December 2016. – Vol. 25(8). – P. 1376 – 1440.*
2. *Горелочное устройство двухкаскадной конфигурации для высокоскоростного воздушно-топливного напыления на жидком топливе [Текст] / Ю. И. Евдокименко, В. М. Кисель, Г. А. Фролов, С. В. Бучаков // Вестник двигателестроения. – 2015. – № 2. – С. 143 – 148.*
3. *Korobov, Yu. S. Deposition of protective coatings by means of supersonic flame spraying [Text] / Yu. S. Korobov // Thermal engineering. – 2009. – Vol. 56, No. 2. – P. 142-146.*
4. *Патент DE 102009051948A1, МПК B05B 7/20, C23C 4/12. Verfahren und Brenner zur Erzeugung von Beschichtungen [Text] / Matthäus Götz ; Заявитель Thermico GmbH & Co. KG (DE). – № DE200910051948 ; заявл. 04.11.2009, дата подачи 04.11.2009 ; дата публ. 05.05.2011.*
5. *Пат. Украины 90044, МПК (2006) B05B 7/00. Газополуменевий пальник для надзвукового напылення покриттів [Текст] / Долматов А. И., Зорик И. В., Данько К. А. ; Заявитель и патентообладатель Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт». – № a200809654 ; заявл. 25.01.2010, бюл. № 2 ; опубл. 25.03.2010, бюл. № 6. – 6 с.*
6. *Данько, К. А. Моделирование течения газа внутри тракта двухкамерной горелки для сверхзвукового газопламенного напыления покрытий [Текст] / К. А. Данько // Вестник двигателестроения. – 2017. – № 1. – С. 130 – 138.*

7. Вопнерук, А. А. Совершенствование технологии высокоскоростного газопламенного напыления износостойких покрытий со структурой метастабильного аустенита [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.10 / Вопнерук Александр Александрович; Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург. – 2011. – 178 с.

8. Вопросы математического моделирования и экспериментальной обработки газодинамических и теплообменных процессов в горелочных устройствах для высокоскоростного газопламенного напыления [Текст] / В. И. Тимошенко, В. П. Галинский, И. С. Белоцерковец, В. М. Кисель, Ю. И. Евдокименко, В. Х. Кадыров // IV Minsk International Forum on Heat and Mass Transfer, 22-26 May 2000 / Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси. – 2000. – Т. 4. – С. 261-268.

9. Шишкин, А. С. Примеры расчетов аэродинамических процессов переработки сыпучих материалов в Excel [Электронный ресурс] / А. С. Шишкин. – Режим доступа: <http://study.urfu.ru/> (дата обращения 10.05.2017).

10. Кинематика твёрдой частицы, разгоняемой потоком газа в сверхзвуковом сопле, и деформационное упрочнение обработанной поверхности [Текст] / А. И. Долматов, С. В. Сергеев, М. А. Курин, В. В. Воронько, Т. В. Лоза // Металлофизика и новейшие технологии. – 2015. – Т. 37, № 7. – С. 871-885.

11. Математическая модель сверхзвукового воздушно-плазменного напыления [Текст] / С. И. Головин, В. А. Аверченко, Л. Г. Попович, А. Ф. Пузыряков // Журнал "Сварочное Производство". – 2008. – № 2. – С. 16-22. ISSN 1562-322X.

12. Li, Mingheng. Modeling and Control of High-Velocity Oxygen-Fuel (HVOF) Thermal Spray: A Tutorial Review [Text] / Mingheng Li, Panagiotis D. Christofides // Journal of Thermal Spray Technology. – 2009. – № 18(5). – P. 849 – 857.

13. Термодинамика тугоплавких карбидов и карбонитридов [Текст] / А. В. Турчанин, М. А. Турчанин. – М. : Металлургия, 1991. – 352 с.

3. Korobov, Yu. S. Deposition of protective coatings by means of supersonic flame. *Thermal engineering*, 2009, vol. 56, no. 2, pp. 142-146.

4. Götz, Matthäus. *Verfahren und Brenner zur Erzeugung von Beschichtungen*. Patent DE, no. 102009051948 A1, 2011.

5. Dolmatov, A. I., Zorik, I. V., Danko, K. A. *Назополуменевуу pal'nyk dlya nadzvukovoho napyleniya pokryttiv* [Gas-flame torch for supersonic deposition of coatings]. Patent UA, no. 90044, 2010. 6 p.

6. Danko, K. A. Modelirovanie techeniya gaza vnutri trakta dvuhkamernoj gorelki dlia sverhzhukovogo gazoplazmennogo napyleniya pokrytii [Modeling of the gas flow within the two-chamber burner for supersonic gas-flame spraying of coatings]. *Vestnik dvigatelestroenija – Bulletin engine*, 2017, no. 1, pp. 130 – 138.

7. Vopneruk, A. A. *Sovershenstvovanie tehnologii vysokoskorostnogo gazoplazmennogo napyleniya iznosostojkikh pokrytij so strukturoj metastabil'nogo austenita kand. tekhn. Nauk* [Perfection of high-speed gas-flame spraying technology of wear-resistant coatings with the structure of metastable austenite. Kand. eng. sci. diss.] Ekaterinburg, Ural'skij federal'nyj universitet imeni pervogo Prezidenta Rossii B. N. El'cina Publ., 2011. 178 p.

8. Timoshenko, V. I., Galinsky, V. P., Belocerkovets, I. S., Kisel, V. M., Evdokimenko, Ju. I., Kadyrov, V. H. *Voprosy matematicheskogo modelirovanija i jeksperimental'noj otrabotki gazodinamicheskikh i teploobmennyh processov v gorelochnyh ustroystvah dlja vysokoskorostnogo gazoplazmennogo napylenija* [Questions of mathematical modeling and experimental development of gas-dynamic and heat-mass exchange Processes in burners for high-speed flame spraying]. *IV Minsk International Forum on Heat and Mass Transfer*, 22-26 May 2000, Institut teplo- i massobmena imeni A. V. Lykova Nacional'noj akademii nauk Belarusi Publ., 2000, vol. 4, pp. 261-268.

9. Shishkin, A. S. *Primery raschetov ajerodinamicheskikh processov pererabotki syuchih materialov v Excel* [Examples of calculations of aerodynamic processes of processing of bulk materials in Excel]. Available at: <http://study.urfu.ru/> (Accessed 10.05.2017).

10. Dolmatov, A. I., Sergeev, S. V., Kurin, M. A., Voronko, V. V., Loza, T. V. *Kinematika tvjorodoj chasticy, razgonjaemoj potokom gaza v sverhzhukovom soople, i deformacionnoe uprochnenie obrabotannoj poverhnosti* [Kinematics of a solid particle accelerated by a gas flow in a supersonic nozzle and strain hardening of the treated surface]. *Metallofizika i novejshe tehnologii – Metallophysics and the latest technologies*, 2015, vol. 37, no. 7, pp. 871-885.

11. Golovin, S. I., Averchenko, V. A., Popovich, L. G., Puzryakov, A. F. *Matematicheskaja model' svephzvukovogo vozdušno-plazmennogo napylenija* [A mathematical model of supersonic air-plasma deposition]. *Zhurnal "Svarochnoe Proizvodstvo" – Magazine "Welding Production"*, 2008, no. 2, pp. 16-22. ISSN 1562-322X.

References

1. Vardelle, Armelle., Moreau, Christian., Akedo, Jun. et al. The 2016 Thermal Spray Roadmap. *Journal of Thermal Spray Technology*, December 2016, vol. 25(8), pp. 1376 – 1440.

2. Evdokimenko, Yu. I., Kisel, V. M., Frolov, G. A., Buchakov, S. V. *Gorelochnoe ustrojstvo dvuhkaskadnoj konfiguracii dlja vysokoskorostnogo vozdušno-toplivnogo napylenija na zhidkom toplive* [Burner device of a two-stage configuration for high-speed air-fuel spraying with liquid fuel]. *Vestnik dvigatelestroenija – Bulletin engine*, Zaporozhye, 2015, no. 2, pp. 143 – 148.

12. Li, Mingheng., Christofides, Panagiotis D. Modeling and Control of High-Velocity Oxygen-Fuel (HVOF) Thermal Spray: A Tutorial Review. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2009, no. 18(5), pp. 849 – 857.

13. Turchanin, A. V., Turchanin, M. A. *Termodinamika tugoplavkih karbidov i karbonitridov* [Thermodynamics of refractory carbides and carbonitrides]. Moscow, Metallurgija Publ., 1991. 352 p.

Поступила в редакцию 14.05.2017, рассмотрена на редколлегии 8.06.2017

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЗМІНИ ШВИДКОСТІ ТА ТЕМПЕРАТУРИ ЧАСТИНОК Cr_3C_2 ПІД ЧАС НАДЗВУКОВОГО ГАЗОПОЛУМЕНЕВОГО НАПИЛЕННЯ ПОКРИТТІВ ДВОКАМЕРНИМ ПАЛЬНИКОМ

К. А. Данько

Наведено математичну модель, що описує зміни швидкості і температури частинок напилюваного матеріалу в тракці двухкамерного пальника для надзвукового газопламенного напилення та від зрізу камери змішання пальника до підкладки. В якості компонентів палива в розрахунках прийняті МАФ-газ і кисень. Розрахунки температури і швидкості частинок виконано для карбїду хрому розміром 40 мкм. Отримані результати показують, що завдяки оригінальній конструкції пальника істотно поліпшуються умови для теплової релаксації напилюваного матеріалу, а також розширюються можливості управління процесом напилення.

Ключові слова: надзвукове газополуменеве напилювання, двокамерний пальник, карбїд хрому, математична модель, коефіцієнт лобового опору, ежектор, число Рейнольдса, підкладка.

MODELLING OF THE VELOCITY AND TEMPERATURE CHANGES OF Cr_3C_2 PARTICLES IN THE PROCESS OF HIGH VELOCITY OXYGEN FUEL SPRAYING BY TWIN-COMBUSTION-CHAMBER BURNER

K. A. Danko

A mathematical model describing changes in the velocity and temperature of the particles of the sprayed material inside and outside of a two-chamber of high velocity oxygen fuel burner is given. MAPG gas and oxygen were taken as components of the fuel in the calculations. Determination of the 40 μm chromium carbide particles temperature and velocity is performed. The results show that, thanks to the original design of the burner, the conditions for thermal relaxation of the sprayed material are substantially improved, and the possibilities for controlling the spraying process are enhanced.

Keywords: high velocity gas-thermal spraying, twin-combustion-chamber burner, chromium carbide, mathematical model, drag coefficient, ejector, Reynolds number, substrate.

Данько Константин Анатольевич – старший преподаватель кафедры «Технологии производства авиационных двигателей», Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», г. Харьков, Украина, e-mail: kostiantyn.a.danko@gmail.com.

Danko Kostiantyn Anatoliiovych – senior lecturer of “Technologies of aircraft engines manufacturing” department, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “KhAI”, Kharkov, Ukraine, e-mail: kostiantyn.a.danko@gmail.com.