

# ПРОВЕРКА НА АДЕКВАТНОСТЬ МОДЕЛИ РАСТЕКАНИЯ ЧАСТИЦЫ НА ПОДЛОЖКЕ ПРИ ПЛАЗМЕННОМ НАПЫЛЕНИИ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

*Ф.И. ПАНТЕЛЕЕНКО<sup>1</sup>, доктор техн. наук,  
чл.-корр. НАН Беларуси*

*Г.Ф. ГРОМЫКО<sup>2</sup>, канд. физ.-мат. наук,  
вед. науч. сотрудник.*

*В.В. ОКОВИТЫЙ<sup>1</sup>, аспирант*

*(<sup>1</sup>БНТУ, г. Минск,*

*<sup>2</sup>ИМ НАН Беларуси, г. Минск)*

Поступила 6 апреля 2015

Рецензирование 6 мая 2015

Принята к печати 15 мая 2015

**Пантелеенко Ф.И.** – 220013, Республика Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 65,  
Белорусский национальный технический университет,  
e-mail: panteleyenkofi@mail.ru

Представлено математическое описание процесса растекания и одновременного затвердевания жидкой частицы при соударении ее с твердой поверхностью подложки и построены приближенные численные методы для расчета. Эти алгоритмы являются продолжением численных исследований по разработке приближенных методов расчета, в которых исследовались упрощенные модели для отдельных величин, таких как температура в частице, подложке, в области контакта, нахождение поля скоростей для определения формы растекшейся частицы.

Разработанная модель позволяет проводить численные эксперименты по исследованию процесса соударения отдельной капли с пространственной поверхностью и ее растекание, а также формирование структуры плазменных покрытий. Результаты исследований показывают, что численные методы являются достаточно эффективными при изучении нелинейных задач. На базе проведенных экспериментальных исследований процессов взаимодействия с подложкой и растекания на ней частиц показана адекватность разработанных теоретических зависимостей.

**Ключевые слова:** частица, моделирование, алгоритм, поля скоростей, процессы растекания и затвердевания, плазменное напыление, теплозащитные покрытия.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-2-24-31

## Введение

Первые работы по моделированию динамики течения жидкости с помощью основных законов сохранения принадлежат представителям Лос-Аламосской лаборатории (Harlow, Shannon) и появились впервые в 1955 г. [1]. Ими были проведены исследования только динамики растекания частицы, процессы передачи тепла в их работах не обсуждались. В дальнейшем рядом авторов были рассмотрены модели, базирующиеся на основных законах сохранения

при различных упрощениях [2–5]. В работе [6] представлено математическое описание процесса растекания и одновременного затвердевания жидкой частицы при соударении ее с твердой поверхностью подложки и построены приближенные численные методы для расчета. Эти алгоритмы являются продолжением численных исследований по разработке приближенных методов расчета [7, 9–11], в которых исследовались упрощенные модели для отдельных величин, таких как температура в частице, подложке, в области контакта, нахождение поля скоростей для

определения формы растекшейся частицы и др. Однако для описания адекватного технологического процесса по созданию покрытий этих моделей было недостаточно. При формировании покрытий появилась необходимость в качественном исследовании структуры покрытия, в частности, определение механизма образования поры и прогнозирование их появления. Поэтому возникла необходимость более детально рассмотреть растекание одиночной частицы, описать изменения ее формы от условий процесса. Такие процессы описываются нестационарными нелинейными уравнениями в частных производных гиперболического и параболического типа. Эти задачи достаточно сложны, и практически единственными методами их решения являются приближенные методы [12]. Хорошо зарекомендованных численных методов для задач со свободной поверхностью, к которым относятся рассматриваемые процессы, пока не существует. Поэтому разработка новых методов решения задач динамики жидкости со свободными границами, изменяющейся со временем и с учетом затвердевания, является актуальной [10–15].

Цель нашего исследования – разработка численного метода и алгоритма решения с учетом свободной поверхности, в котором более точно предлагается учитывать свободную поверхность расплава.

### Теория. Растекание частиц (численный эксперимент)

На основе математической модели растекания расплавленной частицы при плазменном напылении, подробно описанной в источнике [8], получены результаты моделирования процесса напыления порошка, состоящего из сферических частиц оксида циркония диаметром 20 мкм, начальной температуры 300 К, первоначальной скорости соударения 200 м/с и подложке из стали температуры 298 К. На рис. 1 приведены графики формы растекшейся частицы в различные моменты времени. На рис. 2 иллюстрируется изменение формы частицы при решении по схемам с использованием функции объема для нахождения свободной поверхности. Как видно из последних графиков, изображенных на рис. 2,

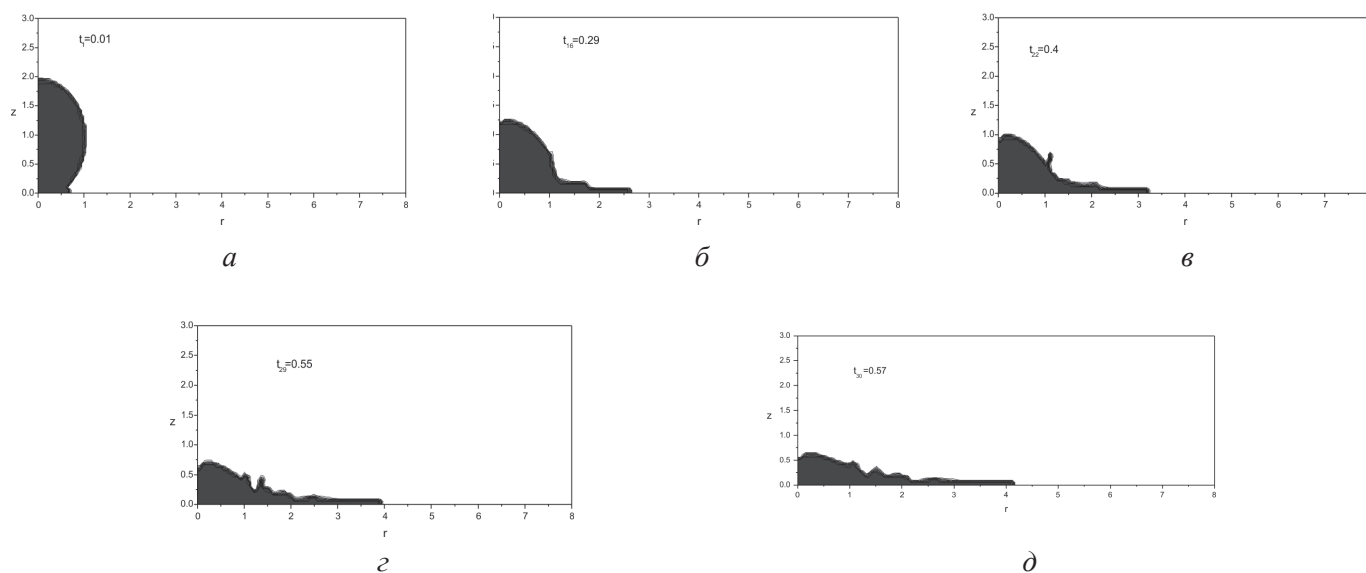


Рис. 1. Форма растекшейся частицы в различные моменты времени с использованием функции объема:

*a* – 0,01; *б* – 0,29; *в* – 0,4; *г* – 0,5; *д* – 0,57

появляется вычислительная неустойчивость, которая связана с недостаточно корректной обработкой точек свободной поверхности. На рис. 3 изображены графики формы свободной поверхности, которые основываются на более точном определении поведения жидкости в свободных ячейках с помощью введения двух маркеров в

каждой ячейке свободной поверхности, которые отслеживают ее границу. Кроме того, для каждой ячейки свободной поверхности знание координат двух маркеров в ней позволяет более точно находить нормали в точках свободной поверхности и главные кривизны, которые используются в условии Лапласа, определяю-

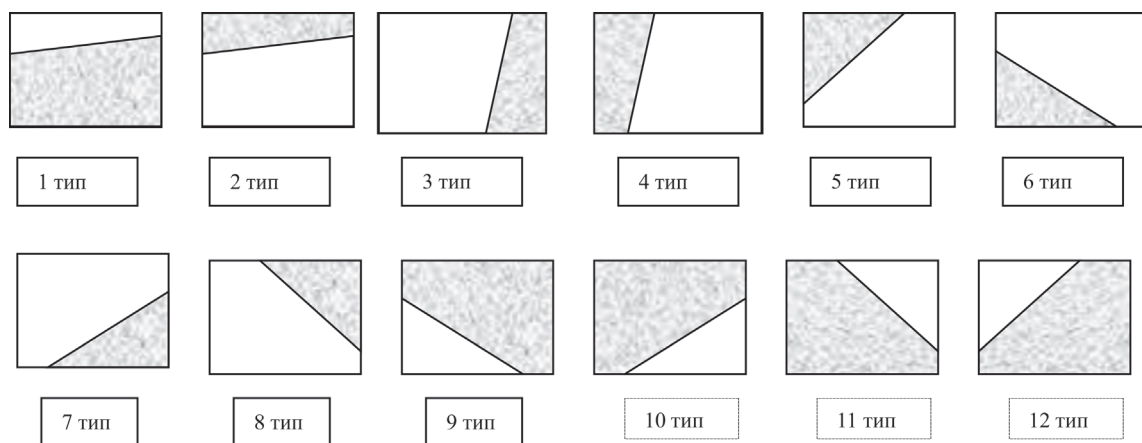


Рис. 2. Типы ячеек свободной поверхности

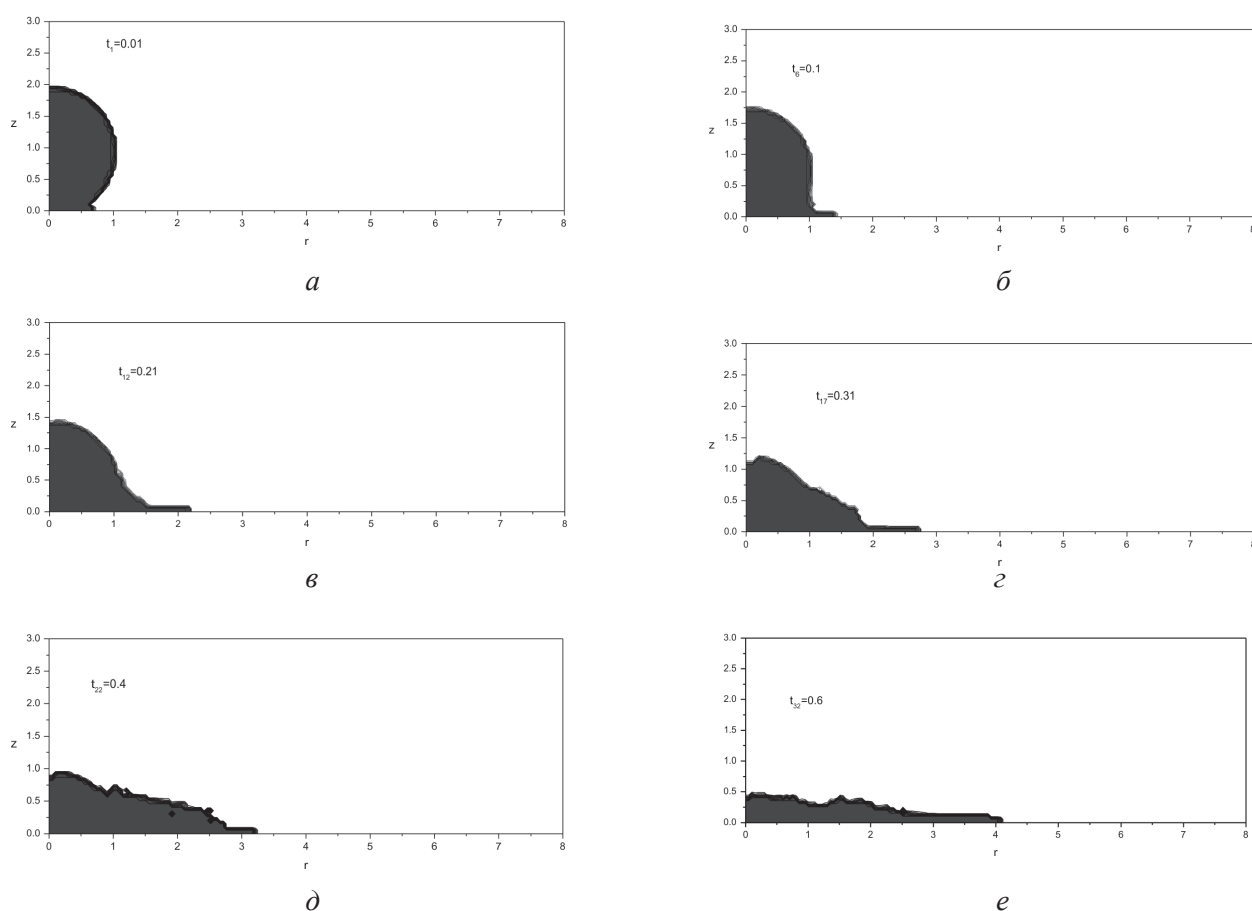


Рис.3. Форма растекшейся частицы в различные моменты времени с использованием маркеров:

$a - 0,01; б - 0,1; в - 0,21; г - 0,31; д - 0,4; e - 0,6$

щего границу жидкость – газ. Расчетный алгоритм рассматривает 12 типов дробных ячеек, отличающихся друг от друга видом пересечения ячейки свободной поверхностью частиц, вид которых представлен на рисунке (темные области представляют собой вещество частицы). Рассматриваемые дробные (неполные) ячейки являются отдельными ячейками сетки, обра-

зованные пересечением движущейся (лагранжевой) границы с фиксированной (эйлеровой) сеткой. Предполагая линейный характер движения вещества в ячейке, очевидно, что достаточно двух маркеров (точек), «поставленных» в точках пересечения вещества с координатными линиями сетки для описания поведения границы вещества в ячейке. Такого количества маркеров

было достаточно и для определения нормалей и радиусов кривизны в точках свободной поверхности. Нумерация (в порядке возрастания) маркеров-точек  $M_k, k = 1, 2$ , в дробных ячейках производится таким образом, чтобы область, занятая веществом в ячейке, находилась слева. Общая нумерация маркеров (в порядке возрастания)  $M_l^*, l = 1, M_N$ , производится в порядке движения против часовой стрелки, что соответствует случаю движения, когда область, занятая веществом, находилась слева. При таком определении ясно, что  $M_l^*$  для одной дробной ячейки будет  $M_2$ , для другой  $M_1$  в зависимости от места пересечения вещества с координатной сеткой. Поэтому расчетный алгоритм рассматривает 12 типов дробных ячеек, отличающихся друг от друга видом пересечения свободной поверхности частиц ячейки сеточной области.

Для определения типа ячейки дополнительно введен признак  $m_k$  для маркера  $M_k$  (см. рис. 3, слева), по которому можно судить о нахождении маркера в ячейке:  $m_k = 1...4$  – маркер  $M_k$  находится на соответствующей стороне ячейки,  $m_k = 5$  – внутри ячейки,  $m_k = 6...9$  – в вершинах ячейки.

Численный алгоритм включает в себя следующие этапы:

1) нахождение давления путем решения эллиптического уравнения итерационным методом установления на известной области;

2) решение итерационной системы относительно неизвестных компонент вектора скорости с учетом найденного давления, нахождение совокупности значений  $u = u_{ij}$ ;  $v = v_{ij}$ , представляющих собой значения вектора скорости в узлах выбранной сетки;

3) нахождение с помощью вычисленных скоростей координат маркеров, определяющих новую границу области. Определение поверхности частицы при помощи новых значений граничных точек;

4) перераспределение ячеек по заданной постоянной эйлеровой сетке с учетом нового положения границы области, формирование исходя из новых координат точек, ввод новых маркеров для определения свободной границы и т. д.

### Результаты и их обсуждение.

#### Проверка на адекватность предложенной модели растекания частицы по подложке при плазменном напылении

Для проверки на адекватность предложенной модели был рассмотрен также процесс плазменного напыления порошка оксида циркония.

На рис. 4 и 5 показана последовательность сплющивания расплавленных частиц оксида циркония на полированной поверхности подложки. После удара жидкая частица быстро плющится на границе частица-подложка.

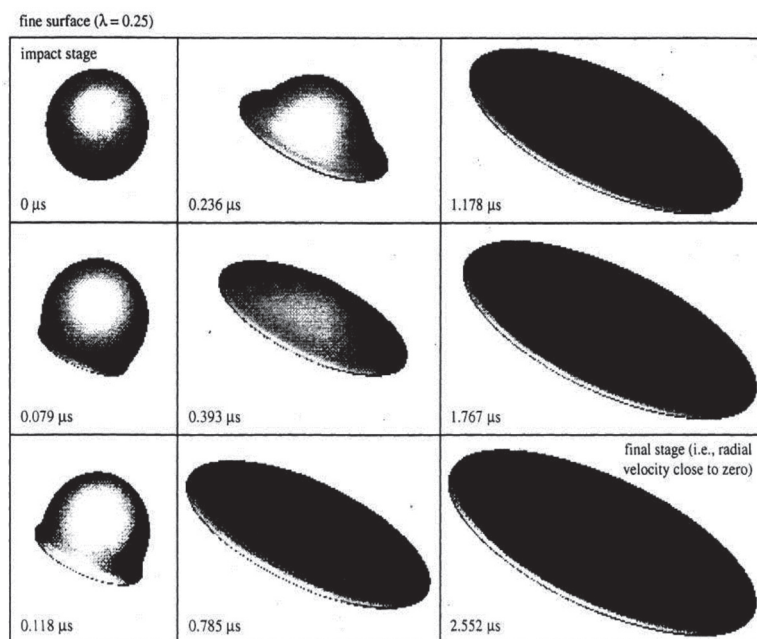


Рис. 4. Напыление расплавленной частицы оксида циркония на полированную поверхность (расчетные данные)



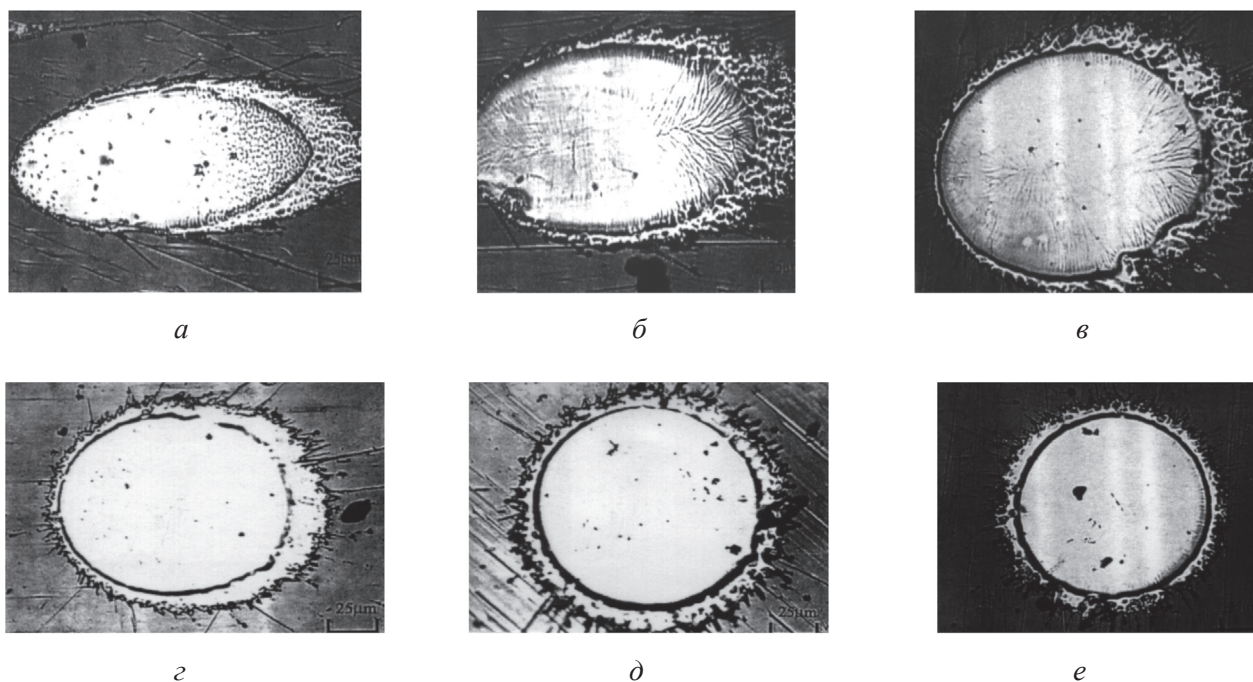


Рис. 5. Напыление расплавленной частицы оксида циркония на полированную поверхность при различных временах нахождения частицы в плазменной струе:  
 $a - 0,3 \mu\text{s}$ ;  $b - 0,4 \mu\text{s}$ ;  $в - 0,8 \mu\text{s}$ ;  $г - 1,2 \mu\text{s}$ ;  $д - 1,8 \mu\text{s}$ ;  $e - 2,5 \mu\text{s}$

С увеличением времени нахождения частицы в плазменной струе высота расплющенной частицы уменьшается, а диаметр ее увеличивается. На рис. 5 показаны реальные расплющенные частицы оксида циркония при различных временах нахождения частицы в плазменной струе.

### Выводы

По предложенным в работе схемам и алгоритмам реализации модели растекания частицы по подложке при плазменном напылении можно определить форму растекания одиночной частицы в различные моменты времени. При учете контакта с холодной подложкой в зависимости от температур частицы и подложки можно получить форму затвердевшей частицы. Путем вычислительного эксперимента может быть проведен анализ факторов, влияющих на растекание и затвердевание расплавленной частицы.

Таким образом, разработанная модель позволяет проводить численные эксперименты по исследованию процесса соударения отдельной капли с пространственной поверхностью и ее растекание, а также формирование структуры плазменных покрытий.

Результаты исследований показывают, что численные методы являются достаточно эффективными при изучении нелинейных задач.

На базе проведенных экспериментальных исследований процессов взаимодействия с подложкой и растекания на ней частиц показана адекватность разработанных теоретических зависимостей. Из расчетов по построенным алгоритмам представляется возможность исследовать механизм формирования покрытия при послойной укладке частиц, что позволяет анализировать допустимые пути формирования плазменных теплозащитных покрытий.

### Список литературы

1. Nichols B.D., Hirt C.W., Hotchkiss R.C. SOLA-VOF: a solution algorithm for transient fluid flow with multiple free boundaries: report LA-8355 (US-32 and US-34). – Los Alamos: Los Alamos National Scientific Laboratory Publ., 1980. – 58 p.
2. Нанесение покрытий плазмой / В.В. Кудинов, П.Ю. Пекшев, В.Е. Белащенко, О.П. Солоненко, В.А. Сафиуллин. – М.: Наука, 1990. – 408 с. – ISBN 5-02-006040-2.
3. Солоненко О.П., Смирнов А.В. Соударение капли расплава с поверхностью: теория и модельный эксперимент // Доклады Академии наук. – 1998. – Т. 363, № 1. – С. 46–49.
4. Fukunuma H. A porosity formation and flattening model of an impinging molten particle in thermal spray coatings // Journal of Thermal Spray Technology. – 1994. – Vol. 3, iss. 1. – P. 33–34. – doi: 10.1007/BF02648997.



5. Исследование структуры плазменных износостойких покрытий на основе оксидной керамики с включениями твердой смазки / Ф.И. Пантелеенко, В.А. Оковитый, Т.Л. Талако, О.Г. Девойно, А.Ф. Пантелеенко, В.В. Оковитый // Наука и техника. – Минск, 2013. – № 5. – С. 15–21.

6. Девойно О.Г., Оковитый В.В. Композиционный порошок на основе диоксида циркония, частично стабилизированный оксидом церия // Наука и техника. – Минск, 2013. – № 6. – С. 3–8.

7. Моделирование растекания и затвердевания частицы при плазменном напылении / Г.Ф. Громыко, Г.М. Заяц, А.Ф. Ильющенко, С.П. Кундас // Порошковая металлургия: республиканский межведомственный сборник научных трудов / Национальная академия наук Беларуси. – Минск, 1999. – Вып. 22. – С. 101–107.

8. Моделирование процессов газотермического напыления покрытий / А.Ф. Ильющенко, В.А. Оковитый, А.И. Шевцов, Г.Ф. Громыко. – Минск: Беспринт, 2008. – 264 с.

9. Моделирование процессов формирования теплозащитных покрытий на основе диоксида циркония, стабилизированного оксидами редкоземельных металлов / Г.Ф. Громыко, А.Ф. Ильющенко, А.И. Шевцов, В.В. Оковитый // Порошковая металлургия: республиканский межведомственный сборник научных трудов / Национальная академия наук Беларуси. – Минск: Белорусская наука, 2013. – Вып. 36. – С. 36–40.

10. Simulation and experimental studies of particles interaction with plasma jet in vacuum plasma spraying processes / S. Kundas, V. Gurevich, A. Ilyuchenko, V. Okovity // Journal of Advanced Materials. – 2000. – Vol. 32, iss. 3. – P. 3–11.

11. Кундас С.П., Ильющенко А.Ф., Оковитый В.А. Релаксация напряжений в плазменных покрытиях за

счет образования трещин // Порошковая металлургия: республиканский межведомственный сборник научных трудов / Национальная академия наук Беларуси. – Минск: Тонпик, 2002. – Вып. 25. – С. 79–84.

12. Оковитый В.А. Модель напряженного состояния системы «покрытие-подложка» при плазменном напылении // Порошковая металлургия: республиканский межведомственный сборник научных трудов / Национальная академия наук Беларуси. – Минск: Геопринт, 2003. – Вып. 26. – С. 113–116.

13. Моделирование режимов напыления плотной керамики на основе диоксида циркония / В.А. Оковитый, Г.Ф. Громыко, А.Ф. Ильющенко, Н.П. Мацука, Ф.И. Пантелеенко, А.И. Шевцов, В.В. Оковитый // Порошковая металлургия: республиканский межведомственный сборник научных трудов / Национальная академия наук Беларуси. – Минск: Белорусская наука, 2010. – Вып. 33. – С. 9–20.

14. Моделирование процесса формирования керамических покрытий на основе диоксида циркония / Г.Ф. Громыко, В.А. Оковитый, А.Ф. Ильющенко, А.И. Шевцов, В.В. Оковитый // Порошковая металлургия: республиканский межведомственный сборник научных трудов / Национальная академия наук Беларуси. – Минск: Белорусская наука, 2012. – Вып. 35. – С. 170–176.

15. Разработка системы уравнений по определению температуры и напряжений при формировании теплозащитных покрытий на основе диоксида циркония, стабилизированного оксидами редкоземельных металлов / Г.Ф. Громыко, А.Ф. Ильющенко, А.И. Шевцов, В.В. Оковитый // Порошковая металлургия: республиканский межведомственный сборник научных трудов / Национальная академия наук Беларуси. – Минск: Белорусская наука, 2014. – Вып. 37. – С. 198–207.

## OBRAHOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 2(67), April – June 2015, Pages 24–31

### Test for adequacy of model of particle spreading over the substrate during plasma spraying of thermal barrier coatings

**Panteleenko F.I.**<sup>1</sup>, D.Sc. (Engineering), Professor, Corresponding Member, National Academy of Sciences of Belarus, e-mail: panteleyenkovfi@mail.ru

**Gromyko G.F.**<sup>2</sup>, Ph.D. (Physics and Mathematics), Leading Researcher, e-mail: grom@im.bas-net.by

**Okovity V.V.**<sup>1</sup>, Ph.D. student, e-mail: okovvas@gmail.com

<sup>1</sup> Belarussian National Technical University, 65 Nezavisimosty avenue, Minsk, 220013, Republic of Belarus

<sup>2</sup> Institute of Mathematics, National Academy of Sciences of Belarus, 11 Surganova str., Minsk, 220013, Republic of Belarus

## Abstract

A mathematical description of the process of spreading and simultaneous solidification of the liquid particles, when it collides with the solid surface of the substrate is presented and approximate numerical methods for the calculation are constructed in the article. These algorithms are a continuation of numerical studies on the development of approximate methods of calculation, which examined simplified models for individual variables, such as temperature in the particle, in the substrate, in the contact area, for finding the velocity field for determining the shape of the spreaded particle.

The developed model allows carrying out numerical experiments to study the collision process of an individual drop with the spatial surface and its' spreading, as well as the formation of the structure of plasma coatings. The results show that the numerical methods are quite effective in the study of nonlinear problems. On the basis of experimental studies of processes of interaction of the particles with the substrate and spreading on it the adequacy of the developed theoretical dependencies is shown.

## Keywords:

particle, simulation, algorithm, velocity fields, flow and solidification processes, plasma spraying, thermal barrier coatings.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-2-24-31

## References

1. Nichols B.D., Hirt C.W., Hotchkiss R.C. SOLA-VOF: A solution algorithm for transient fluid flow with multiple free boundaries. Report LA-8355 (US-32 and US-34). Los Alamos, Los Alamos National Scientific Laboratory Publ., 1980. 58 p.
2. Kudinov V.V., Pekshev P.Yu., Belashchenko V.E., Solonenko O.P., Safiullin V.A. *Nanesenie pokrytij plazmoj* [Plasma Coating]. Moscow, Nauka Publ., 1990. 408 p. ISBN 5-02-006040-2
3. Solonenko O.P., Smirnov A.B. Soudarenie kapli rasplava s poverkhnost'yu: teoriya i model'nyi eksperiment [Collision of a melt drop with a surface: theory and a model experiment]. *Doklady Akademii nauk – Doklady Earth Sciences*, 1998, vol. 363, no. 1, pp. 46–49. (In Russian)
4. Fukanuma H. A porosity formation and flattening model of an impinging molten particle in thermal spray coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, 1994, vol. 3, iss.1, pp. 33–44. doi: 10.1007/BF02648997
5. Panteleenko F.I., Okovity V.A., Talako T.L., Devoino O.G., Panteleenko A.F., Okovity V.V. Issledovanie struktury plazmennyykh iznosostoikikh pokrytii na osnove oksidnoi keramiki s vklyucheniymi tverdoi smazki [Investigation of plasma wear resistance coating structure on basis of oxide ceramics with inclusions of solid lubrication]. *Nauka i tekhnika – Science and Technique*, 2013, no. 5, pp. 15–21. (In Russian)
6. Devoino O.G., Okovity V.V. Kompozitsionnyi poroshok na osnove dioksida tsirkoniya, chastichno stabilizirovannyi oksidom tseriya [Composite powder based on zirconium dioxide and partially stabilized by cerium oxide]. *Nauka i tekhnika – Science and Technique*, 2013, no. 6, pp. 3–8. (In Russian)
7. Gromyko G.F., Zayats G.M., Il'yushchenko A.F., Kundas S.P. [Simulation of spreading and solidification of particle during plasma spraying]. *Respublikanskii mezhvedomstvennyi sbornik nauchnykh trudov NAN Belarusi "Poroshkovaya metallurgiya"* [The Republican Interdepartmental Proceedings of NASB "Powder Metallurgy"], 1999, iss. 22, pp. 101–107. (In Russian)
8. Il'yushchenko A.F., Okovity V.A., Shevtsov A.I., Gromyko G.F. *Modelirovanie protsessov gazotermicheskogo napyleniya pokrytii* [Modelling of processes of thermal spraying coatings]. Minsk, Besprint Publ., 2008. 264 p.
9. Gromyko G.F., Il'yushchenko A.F., Shevtsov A.I., Okovity V.V. [Simulation of processes of generation of heat-protection coatings on the basis of double oxide zirconium stabilized with oxides of rare-earth metals]. *Respublikanskii mezhvedomstvennyi sbornik nauchnykh trudov NAN Belarusi "Poroshkovaya metallurgiya"* [The Republican Interdepartmental Proceedings of NASB "Powder Metallurgy"], 2013, iss. 36, pp. 36–40. (In Russian)
10. Kundas S., Gurevich V., Ilyushchenko A., Okovity V. Simulation and experimental studies of particles interaction with plasma jet in vacuum plasma spraying processes. *Journal of Advanced Materials*, 2000, vol. 32, iss. 3, pp. 3–11.
11. Kundas S.P., Il'yushchenko A.F., Okovity V.A. [Stress relaxation in plasma coating due to the formation of cracks]. *Respublikanskii mezhvedomstvennyi sbornik nauchnykh trudov NAN Belarusi "Poroshkovaya metallurgiya"* [The Republican Interdepartmental Proceedings of NASB "Powder Metallurgy"], 2002, iss. 25, pp. 79–84. (In Russian)

12. Okovity V.A. [Model the stress state of the system “covered-ment-support” during plasma spraying]. *Respublikanskii mezhvedomstvennyi sbornik nauchnykh trudov NAN Belarusi “Poroshkovaya metallurgiya”* [The Republican Interdepartmental Proceedings of NASB “Powder Metallurgy”], 2003, iss. 26, pp. 113–116. (In Russian)
13. Okovity V.A., Gromyko G.F., Il'yushchenko A.F., Matsuka N.P., Panteleenko F.I., Shevtsov A.I., Okovity V.V. [Simulation mode spraying dense ceramics based on zirconium dioxide]. *Respublikanskii mezhvedomstvennyi sbornik nauchnykh trudov NAN Belarusi “Poroshkovaya metallurgiya”* [The Republican Interdepartmental Proceedings of NASB “Powder Metallurgy”], 2010, iss. 33, pp. 9–20. (In Russian)
14. Gromyko G.F., Okovity V.A., Il'yushchenko A.F., Shevtsov A.I., Okovity V.V. [Simulation of the process of formation of ceramic-ray coatings based on zirconium dioxide]. *Respublikanskii mezhvedomstvennyi sbornik nauchnykh trudov NAN Belarusi “Poroshkovaya metallurgiya”* [The Republican Interdepartmental Proceedings of NASB “Powder Metallurgy”], 2012, iss. 35, pp. 170–176. (In Russian)
15. Gromyko G.F., Il'yushchenko A.F., Shevtsov A.I., Okovity V.V. [Development of a system of equations to determine the temperature and stress in the formation of thermal barrier coatings based on stabilized zirconia oxides of rare earth metals]. *Respublikanskii mezhvedomstvennyi sbornik nauchnykh trudov NAN Belarusi “Poroshkovaya metallurgiya”* [The Republican Interdepartmental Proceedings of NASB “Powder Metallurgy”], 2014, iss. 37, pp. 198–207. (In Russian)

Received 6 April 2015

Revised 6 May 2015

Accepted 15 May 2015