

Научная статья
УДК 621:004.942:519.87
DOI: 10.34759/vst-2021-4-257-266

МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НАПЫЛЯЕМЫХ ЧАСТИЦ С ПОВЕРХНОСТЬЮ ДЕТАЛИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ

Артем Александрович Ковалев¹ ✉, Александр Сергеевич Краско², Павел Алексеевич Сидоров³

^{1,2,3}Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
Москва, Россия

¹kovalevarta@gmail.com ✉

²krasko_as@mail.com

³sidorovpa@student.bmstu.ru

Аннотация. Рассматриваются проблема оценки адгезии газотермических покрытий, в частности полученных плазменным напылением частиц на поверхность детали, и этапы ее решения. В качестве первого этапа для последующего формирования плазменного покрытия было проведено численное моделирование процессов нагрева, ускорения, переноса напыляемого материала в виде модельной частицы алюминия, а также её ударного взаимодействия с поверхностью, имеющей предварительно полученный микрорельеф. Кроме того, при разных технологических режимах напыления были получены различные формы провзаимодействовавших с поверхностью частиц и определены удельные площади контактирования.

Ключевые слова: плазменное напыление, функциональные покрытия, технологические режимы напыления, численное моделирование, ударное взаимодействие, удельная площадь контактирования

Для цитирования: Ковалев А.А., Краско А.С., Сидоров П.А. Моделирование ударного взаимодействия напыляемых частиц с поверхностью детали при формировании плазменных покрытий // Вестник Московского авиационного института. 2021. Т. 28. № 4. С. 257-266. DOI: 10.34759/vst-2021-4-257-266

Original article

SHOCK INTERACTION SIMULATION OF SPRAYED PARTICLES WITH THE PART SURFACE WHILE PLASMA COATINGS FORMING

Artem A. Kovalev¹ ✉, Aleksandr S. Krasko², Pavel A. Sidorov³

^{1,2,3}Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

¹kovalevarta@gmail.com ✉

²krasko_as@mail.com

³sidorovpa@student.bmstu.ru

© Ковалев А.А., Краско А.С., Сидоров П.А., 2021

Abstract

This article considers the problem of thermal spray coatings adhesion strength assessing to the part surface. Performing numerical modeling of heating and acceleration processes of the sprayed material particles, as well as their collision with the base surface of the set micro-relief employing the ANSYS CFD Premium software is being suggested as the problem solution. The plasma spraying process is being considered as an example.

At the beginning, the article performs the analysis of the literature related to the problem of adhesion strength determining of gas-thermal coatings, obtained by the plasma spraying, with the base surface. The rationale for the need to model the sprayed material particles transfer and collision processes with the base surface is rendered.

The work separates out the stages and general approaches to the plasma spraying process modeling. The main process parameters are being defined, and description of the plasma jet outflow from the nozzle with the flow of particles being sprayed onto the base, is being presented. The curves of the spraying temperature and particles velocity dependency on time were plotted. Comparison of the obtained values with the experimental data is being performed.

Simulation of a single sprayed particle collision with the base at various combinations of temperature and the particle velocity at the moment of the particle approach to the base surface is performed in the work. The micro-relief geometry and size are being determined herewith. As the result, various particle shapes after collision and the value of the specific contacting area for each case under consideration were obtained.

Finally, a qualitative assessment of the interaction between a particle of the sprayed material and the sprayed surface is presented. The most optimal combination of the temperature and particle velocity is identified.

Keywords: plasma spraying, functional coatings, technological modes of spraying, numerical modeling, shock interaction, specific contacting surface

For citation: Kovalev A.A., Krasko A.S., Sidorov P.A. Shock interaction simulation of sprayed particles with the part surface while plasma coatings forming. *Aerospace MAI Journal*, 2021, vol. 28, no. 4, pp. 257-266. DOI: 10.34759/vst-2021-4-257-266

Введение

Для обеспечения растущих требований к поверхностям деталей изделий авиа- и двигателестроения (сопла, лопатки, валы, корпуса камер сгорания, детали гидравлики и газотурбинных двигателей), работающих в условиях многофакторных воздействий, необходимо применение более прогрессивных методов упрочнения, которые одновременно с этим позволят снизить производственные издержки.

Одним из путей решений данной задачи является использование технологии газотермического напыления. Оно позволяет добиться необходимых коррозионной стойкости, износостойкости, термостойкости, жаропрочности и иных эксплуатационных свойств.

В процессе анализа различных литературных источников было выявлено, что методика определения адгезионной прочности σ_a либо отсут-

ствует, либо имеет вид регрессионной зависимости, что не позволяет определять данный параметр для требуемого диапазона режимов напыления. Ввиду этого требуется разработать методику, которая с достаточной точностью будет определять σ_a , как наиболее важную эксплуатационную характеристику покрытия. При этом, ввиду сложности протекания физико-химических процессов формирования газотермического покрытия [1–6], решение данной задачи необходимо разбить на несколько этапов, первым из которых является моделирование и оценка взаимодействия одной частицы потока напыления с поверхностью детали, вторым – оценка взаимодействия с поверхностью группы частиц и третьим – непосредственная оценка адгезионной прочности сформированного покрытия.

Одним из основных методов формирования жаропрочных и теплостойких покрытий деталей,

широко применяющихся в авиастроении, является метод плазменного напыления.

Необходимо отметить, что вышеуказанные этапы, ввиду отсутствия общепринятых аналитических зависимостей, целесообразно выполнять с помощью численного моделирования методом конечных элементов. Так, в работе [7] была рассмотрена модель взаимодействия частицы, состоящей из жидкой и твердой фазы, с плоской поверхностью основы. В работе [8] также был смоделирован процесс соударения полностью расплавленной частицы с основой. Авторы работы [9] рассматривают вопрос переноса напыляемого порошка от сопла к поверхности напыления, работ [10, 11] — вопрос моделирования плазменной струи.

Процесс моделирования плазменного напыления можно разбить на следующие этапы:

- 1) моделирование истечения плазменной струи;
- 2) моделирование переноса порошка в плазменной струе;
- 3) моделирование соударения расплавленной частицы с поверхностью детали (основой).

Данное деление является условным, оно необходимо ввиду того, что для решения общей задачи требуется слишком высокая вычислительная мощность.

Моделирование процесса истечения плазменной струи и переноса частиц порошка

В рассматриваемых литературных источниках [7–12] моделирование проводилось с помо-

щью программного продукта ANSYS CFD Premium. Данное программное обеспечение (ПО) имеет широкий спектр возможностей для численного моделирования процесса напыления. Благодаря этому существует возможность объединения первых двух этапов моделирования, в результате чего должна быть определена скорость и температура частиц в момент подлета к основе.

В качестве материала покрытия был выбран один из базовых материалов в авиастроении — алюминий, напыляемый в виде порошка марки ПР-НХ15СР2 (Al 99,85%) с диаметром частиц 48 мкм. Параметры напыления для моделирования приведены в табл. 1.

С помощью программного продукта ANSYS CFD Premium было проведено моделирование процесса истечения плазменной струи с потоком напыляемых частиц на основу. Модель создавалась в следующей последовательности: 1) построение 3D-модели области течения плазмообразующего газа; 2) выбор и построение сетки; 3) выбор материалов газов, частиц и основы; 4) задание начальных и граничных условий.

Для упрощения процесса моделирования были приняты следующие допущения: геометрической моделью напыляемых частиц является сфера; плазма рассматривается как идеальный газ; основа и сопло плазмотрона абсолютно жесткие и не теплопроводные.

Напыление моделируется при атмосферном давлении. Геометрия сопла, указанная на рис. 1, соответствует плазмотрону модели ПНК-50.

Таблица 1

Параметры напыления

Параметр	Значение
Состав плазмообразующего газа	Воздух+пропан-бутан
Температура плазмы в момент ее истечения из сопла Θ_{02} , К	3800
Расход плазмообразующего газа G_2 , кг/с	0,008
Состав фокусирующего газа	Воздух
Температура фокусирующего газа G_3 , К	300
Расход фокусирующего газа G_3 , кг/с	0,001
Начальная температура порошка Θ_{01} , К	300
Расход порошка G_1 , кг/с	0,024
Средний диаметр частиц d_1 , мкм	48
Дистанция напыления H , мм	120
Угол напыления γ , градусы	90

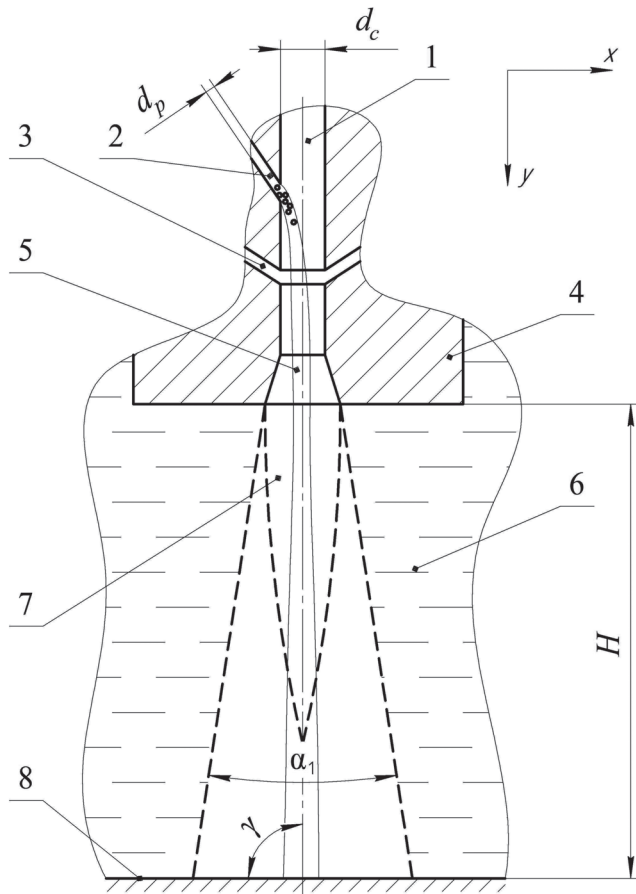


Рис. 1. Схема процесса напыления: 1 – плазменная струя; 2 – канал подачи частиц напыления; 3 – канал подачи частиц напыления; 4 – сопло; 5 – поток частиц; 6 – атмосфера; 7 – плазменная свеча; 8 – поверхность напыления (основа)

Результатом моделирования является распределение скоростей и температур частиц (рис. 2) от момента их ввода до контакта с поверхностью напыления, расположенной на дистанции 120 мм.

В начальный момент времени скорость частиц составляет $v_{\text{ч}} = 24$ м/с. Далее происходит резкое возрастание скорости частиц, что связано с попаданием потока частиц в основной канал сопла. При попадании в расширение сопла, скорость частиц многократно возрастает. Затем происходит постепенное снижение скорости до момента подлета частиц к основе (на момент прохождения частицами 0,12 м). При подлете к основе скорость частиц начинает интенсивно снижаться. Этот эффект объясняется торможением частиц плотным облаком газа, образующимся перед поверхностью напыления [13].

На рис. 2 видно, что нагрев частиц происходит во время движения в канале сопла. Далее при подлете к расширению канала температура частиц достигает пика, после чего из-за перемешивания плазмообразующего газа с атмосферой их температура начинает снижаться.

Полученные данные соответствуют значениям, представленным в табл. 2. Однако для проверки соответствия модели реальным условиям необходимо проведение серии опытов, а также требуется конструктивная модель плазмотрона. Расчет погрешности проводился по формуле

$$\varepsilon = \frac{|\Delta_1 - \Delta_2|}{\Delta_1} \cdot 100\%$$

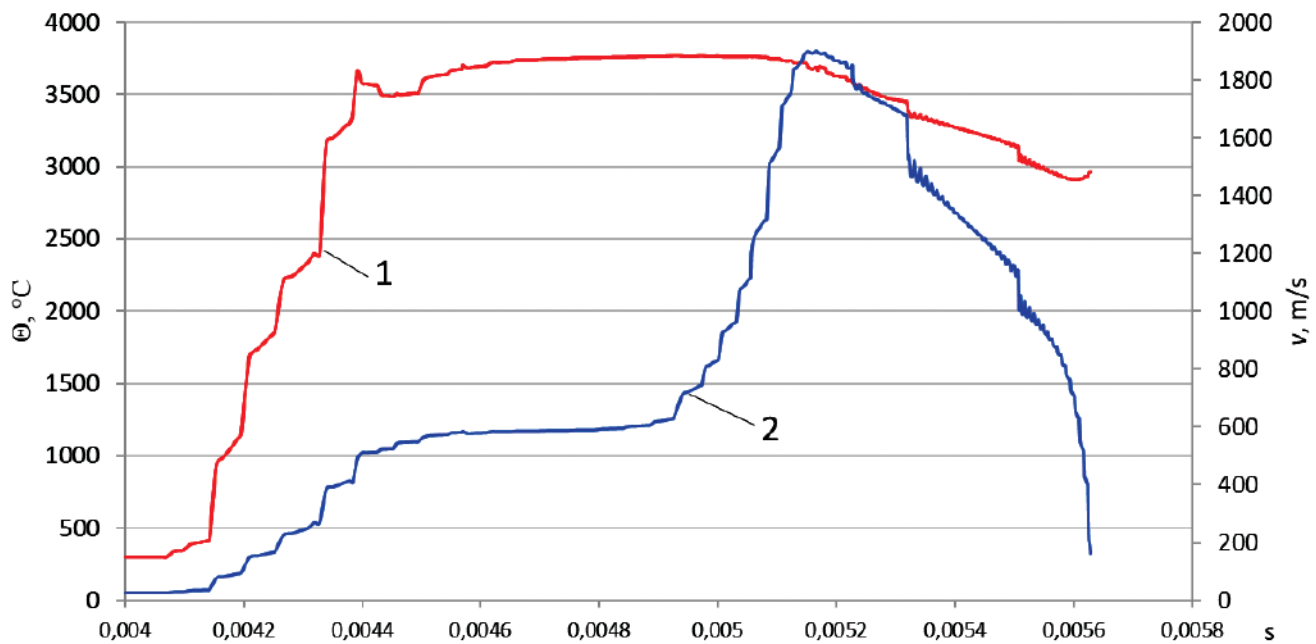


Рис. 2. Распределение температуры (1) и скорости (2) частиц в зависимости от времени полета частиц

Таблица 2

Сравнительная характеристика результатов моделирования в ANSYS CFD Premium и экспериментальных данных

Параметры	Скорость частиц, м/с	Температура частиц на дистанции напыления, К
Результаты моделирования	158±100	3032±110
Результаты эксперимента	207±62	2842±145
Погрешность	23,7%	6,7%

где Δ_1, Δ_2 – параметры, полученные при эксперименте и моделировании соответственно.

Эксперименты, с которыми сравнивается данная модель напыления, имеют следующие характеристики [14]:

- расход плазмообразующего газа $G_2 = 0,008$ кг/с;
- состав плазмообразующего газа: воздух + пропан-бутан;
- расход фокусирующего газа $G_3 = 0,001$ кг/с;
- выходной диаметр сопла $d_c = 10$ мм;
- давление атмосферы $p = 0,1$ МПа;
- температура атмосферы $\Theta_a = 300$ К;
- температура плазмы $\Theta_{02} = 4000$ К.

Таким образом, все характеристики модели, соответствуют характеристикам эксперимента.

Погрешности, полученные при сравнении результатов опыта и моделирования, невысоки, что позволяет сделать вывод о достоверности полученных результатов.

Моделирование процесса соударения одной напыляемой частицы с поверхностью основы

Моделирование соударения проводилось также с помощью ANSYS CFD Premium, в результате чего определялись характер формообразования частицы и удельная площадь её контактирования с поверхностью основы.

Моделирование проводилось в следующей последовательности [15, 16]:

- 1) определение необходимых входных данных;
- 2) постановка задачи;
- 3) создание геометрии основы;
- 4) создание расчетной сетки;
- 5) задание граничных условий и свойств материалов;
- 6) проведение моделирования и анализ полученных результатов.

Входными параметрами для данного этапа моделирования являются:

температура частицы в момент подлета к основе Θ_p , К;

скорость частицы в момент подлета к основе v_{p1} , м/с;

коэффициент теплопроводности частицы λ_1 , Вт/(м·К);

теплоемкость частицы c_1 , Дж/(кг·К);

плотность частицы ρ_1 , кг/м³;

диаметр частицы d_p , мкм;

температура плавления частицы, К;

температура основы в начальный момент времени, К.

В качестве атмосферы был выбран воздух [10].

При создании геометрии основы необходимо задать её микрорельеф. В работе [13] была показана необходимость учета шероховатости поверхности основы при оценке адгезионной прочности, вследствие чего было решено моделировать процесс взаимодействия частицы с поверхностью после пескоструйной обработки (рис. 3).

В работе [17] были изложены рекомендации по выбору микрорельефа, согласно которым он должен состоять из плотно расположенных кратеров. Оптимальный диаметр лунки, равный диаметру частицы абразивного материала, определяется по формуле

$$D = \frac{d_p}{6(h_p H_l)^{0.5}}, \tag{1}$$

где h_p – степень деформации частицы (отношение высоты частицы после соударения к начальному диаметру частицы (после серии моделирования данное отношение составляет 0,29...0,32); H_l – относительная высота лунки (от низшей точки лунки до высшей относительно диаметра абразивной частицы; оптимальное значение согласно [17] составляет 0,3).

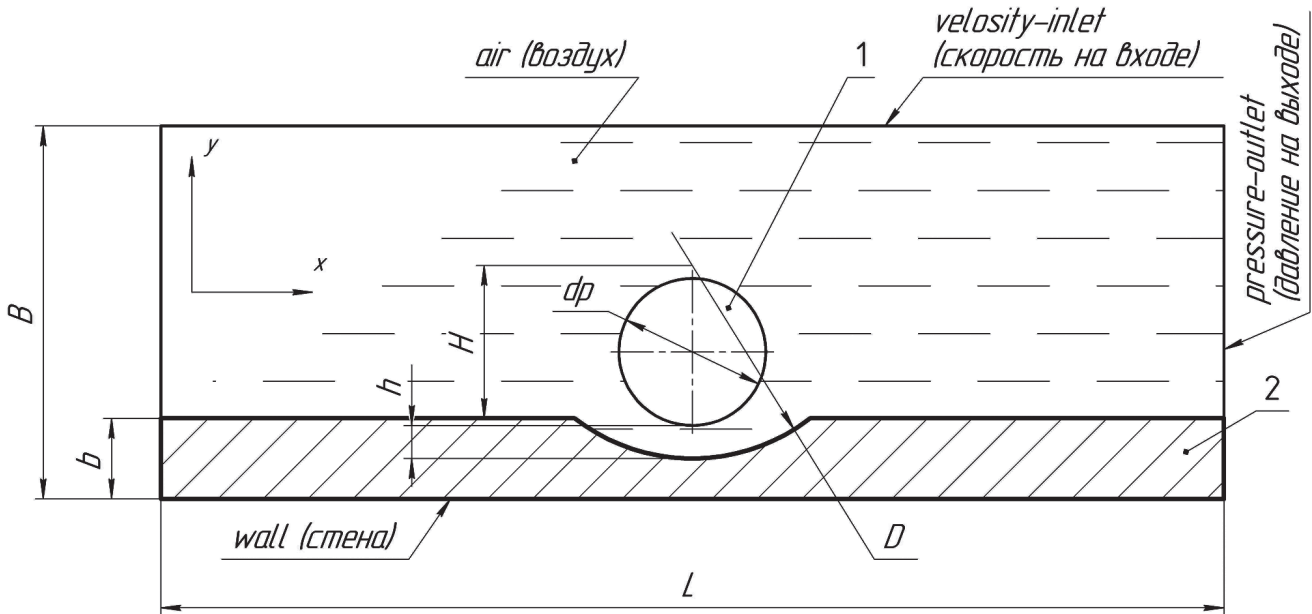


Рис. 3. Постановка задачи с граничными условиями: 1 – частица напыления; 2 – поверхность напыления; B – высота расчетной области, мкм; b – высота части моделируемой сетки, мкм; H – высота центра лунки от плоской части поверхности, мкм; h – максимальная глубина лунки, мкм; D – диаметр лунки, мкм; L – ширина расчетной области, мкм

Зная, что диаметр частиц напыления составляет 48 мкм, найдем диаметр лунки по формуле (1): $D = 98$ мкм.

На основе исследований, представленных в работе [18], были выбраны геометрические параметры расчетной зоны со следующими значениями (рис. 3): $B = 130$ мкм; $b = 110$ мкм; $H = 35$ мкм; $h = 15$ мкм; $L = 380$ мкм.

Расчетная область представлена на рис. 4.

В качестве порядка элементов (element order) был выбран «Quadratic». Такой выбор был сделан для уменьшения требуемой вычислительной мощности. Размер элемента составил 0,5 мкм.

Задача решалась в нестационарной постановке (transient Time). Тип решателя: Pressure-Based (основан на давлении). Такой выбор обоснован

возможностью подключения модели «Volume of Fluid». Также был подключен модуль силы тяжести. Модули, которые были использованы в решении: Multiphase, Energy, Viscous и Solidification & Melting. Коэффициент поверхностного натяжения для алюминия составляет 0,9 Н/м [19].

Граничные условия:

1. «Inlet» – вход плазмы. Расход плазмообразующего газа задавался через давление на входе «pressure inlet». Его величина выбиралась согласно давлению, полученному в пристеночной области при моделировании плазменной струи. Также задавались скорость «velocity» (0,005 м/с) и температура «thermal» газа (950 К).

2. «Outlet» – выход плазмы. Так как моделируется очень малая область поверхности напы-

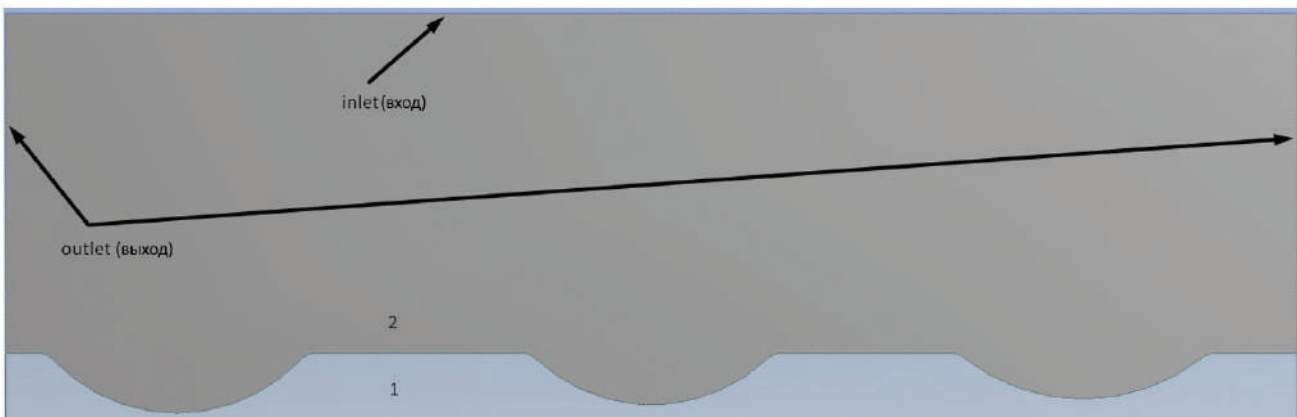


Рис. 4. Геометрия расчетной области: 1 – область стенки; 2 – область воздуха

ления, параметры выхода соответствуют параметрам входа, но скорость плазмы в данном условии не задавалась.

3. «Wall» – стенка. В качестве теплового режима (thermal conditions) задавалась температура «temperature» стенки (650 К), показатель тепловыделения «heat generation rate» (-1000 Вт/м³) и контактное термическое сопротивление «contact resistance» (15 (м²·К)/Вт).

В качестве схемы связи давление—скорость «pressure-velocity coupling» было выбрано условие «coupled». Для поиска полей скоростей и давления используется алгоритм расщепления, а для

остальных параметров – алгоритм установления. Этот алгоритм позволяет получать качественные устойчивые решения практически для всех классов задач. Для улучшения устойчивости решения число Куранта (Courant number) рекомендуется уменьшить до 25...50. Фиксированный временной шаг (time stepping method: fixed) установлен в размере 10⁻⁹ с.

Исходные данные и результаты моделирования представлены в табл. 3 и на рис. 5, где цифрами обозначены случаи взаимодействия частиц с поверхностью основы при различных режимах напыления.

Таблица 3

Начальные данные и результаты моделирования

№ п/п	Исходные данные		Результаты моделирования
	Температура частиц, К	Скорость частиц при подлете к основе, м/с	Удельная площадь контактирования, %
1	950	50	25
2	950	100	6
3	950	120	36
4	1050	120	42
5	900	100	15
6	950	150	24

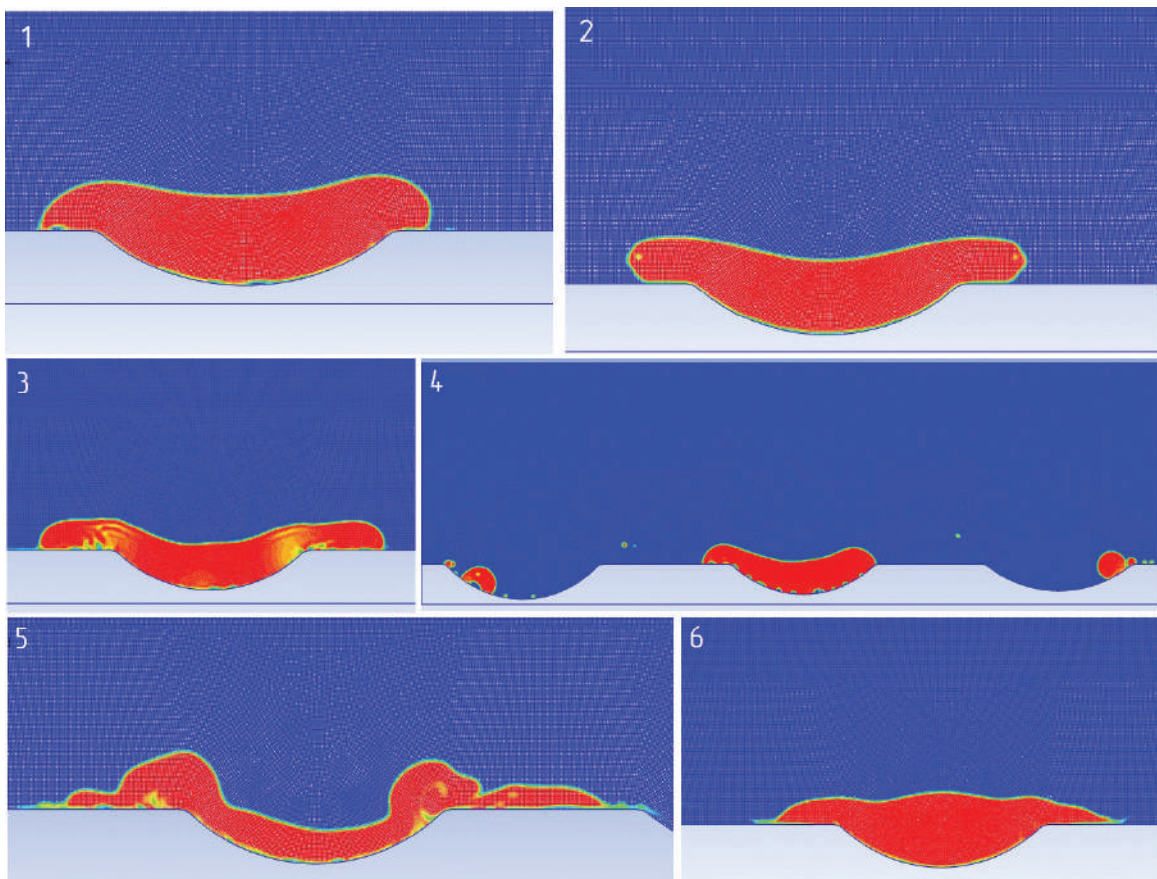


Рис. 5. Результаты моделирования взаимодействия частицы с поверхностью основы

Рис. 5 иллюстрирует состояние частиц после соударения. Основным результатом взаимодействия частиц с основой является удельная площадь контактирования, которая определялась как граница материала частицы (красный цвет) и основы (серый цвет) без других промежуточных фаз (воздух и другие газы).

Из табл. 3 видно, что наилучшим является взаимодействие частицы порошка ПР-НХ15СР2 (Al 99,85%) при температуре 1050 К и скорости 120 м/с. Однако в этом случае частица разрушается и происходит её частичное разбрызгивание, что впоследствии приводит к образованию повышенной пористости и снижению адгезионной прочности напыленного покрытия [1–6, 20–22]. Исходя из этого, наиболее оптимальный вариант формообразования провзаимодействовавшей частицы, имеющей на границе раздела наименьшее содержание включений (газ), наблюдается при комбинации температуры 950 К и скорости 120 м/с. При этом данный режим напыления обеспечивает наибольшую удельную площадь контактирования при условии отсутствия разбрызгивания.

Выводы

На основании проведенного моделирования получены распределения температуры и скорости частиц напыляемого материала в струе плазмообразующего газа, зависящие от основных геометрических параметров плазмотрона и технологических режимом плазменного напыления. Полученные данные позволяют с достаточной точностью определить температуру и скорость частиц на выбранной дистанции напыления и применить эти данные в качестве исходных для моделирования соударения частиц с поверхностью основы.

При моделировании соударения одной частицы рассматривалась её форма после взаимодействия с поверхностью основы и удельная площадь контактирования.

Последующее моделирование взаимодействия потока частиц с поверхностью детали позволит сформировать покрытие, оценить его адгезионную прочность и достоверность выбранных режимов напыления.

Библиографический список

1. *Калита В.И., Комлев Д.И.* Плазменные покрытия с нанокристаллической и аморфной структурой. – М.: Лидер М, 2008. – 388 с.

2. *Кудинов В.В., Бобров Г.В.* Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование: Учебник для вузов. – М.: Металлургия, 1992. – 432 с.
3. *Хасуи А., Моригаки О.* Наплавка и напыление. – М.: Машиностроение, 1985. – 240 с.
4. *Пузряков А.Ф.* Теоретические основы технологии плазменного напыления: Учеб. пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 360 с.
5. *Балдаев Л.Х.* (ред.) Газотермическое напыление: Учеб. пособие. – М.: Маркет ДС, 2007. – 344 с.
6. *Ильюшенко А.Ф., Шевцов А.И., Оковитый В.А.* Процессы формирования газотермических покрытий и их моделирование. – Минск: Беларуская навука, 2011. – 357 с.
7. *Alavi S., Passandideh-Fard M., Mostaghimi J.* Simulation of Semi-Molten Particle Impacts Including Heat Transfer and Phase Change // *Journal of Thermal Spray Technology*. 2012. Vol. 21. No. 6, pp. 1278–1293. DOI: 10.1007/s11666-012-9804-8
8. *Ramachandran C.S., Balasubramanian V., Ananthapadmanabhan P.V.* Multiobjective Optimization of Atmospheric Plasma Spray Process Parameters to Deposit Yttria-Stabilized Zirconia Coatings Using Response Surface Methodology // *Journal of Thermal Spray Technology*. 2011. Vol. 20. No. 3, pp. 590-607. DOI: 10.1007/s11666-010-9604-y
9. *Bobzin K., Öte M., Knoch M.A., Alkhasli I.* Macroscopic particle modeling in air plasma spraying // *Surface & Coatings Technology*. 2018. Vol. 364, pp. 449-456. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2018.07.056
10. *Nylén P., Hansbo A., Friis M.* et al. Investigation of Particle In-flight Characteristics during Atmospheric Plasma Spraying of Yttria Stabilized ZrO₂: Part 2. Modeling. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2001. Vol. 10, pp. 359–366. DOI: 10.1361/105996301770349448
11. *Stummer M., Enzinger N.* CFD Simulation of Particle Movement during Atmospheric Plasma Spraying // 12th International Seminar “Numerical Analysis of Weldability” (23-26 September 2018; Graz University of Technology, Seggau, Austria). DOI: 10.3217/978-3-85125-615-4-42
12. *Zhang Y., Matthews S., Tran A.T.T., Hyland M.* Effects of interfacial heat transfer, surface tension and contact angle on the formation of plasma-sprayed droplets through simulation study // *Surface & Coatings Technology*. 2016. Vol. 307, pp. 807-816. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2016.09.066
13. *Ковалев А.А., Краско А.С.* Влияние параметров газотермического напыления на прочность сцепления функциональных стойких покрытий // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2021. №3. С. 31-39. DOI: 10.31857/S0235711921030081
14. *Шелудяк Ю.Е., Кашпоров Л.Я., Малинин Л.А., Цалков В.Н.* Теплофизические свойства компонентов горючих систем. – М.: Информация и технико-экономические исследования, 1992. – 184 с.

15. Кузьмин В.И., Гуляев И.П., Корниенко Е.Е. и др. Сверхзвуковые плазменные потоки в процессах нанесения покрытий и получения дисперсных материалов // Климовские чтения — 2016. Перспективные направления развития авиадвигателестроения: Сборник докладов Международной научно-технической конференции (20 октября 2016; Санкт-Петербург). СПб.: Скифия-принт, 2016. С. 309-316.
16. Зиновьев В.Е. Теплофизические свойства материалов при высоких температурах: Справочное издание. — М.: Металлургия, 1989. — 382 с.
17. Харламов Ю.А., Борисов Ю.С. Влияние микрорельефа поверхности на прочность сцепления с газотермическими покрытиями // Автоматическая сварка. 2001. № 6. С. 19-26.
18. Tillmann W., Hagen L., Schaak C. et al. Adhesion of HVOF-sprayed WC-Co coatings on 316L substrates processed by SLM // Journal of Thermal Spray Technology. 2020. Vol. 29, pp. 1396-1409. DOI: 10.1007/s11666-020-01081-y
19. Meghwal A., Anupam A., Murty B.S. et al. Thermal spray high-entropy alloy coatings: a review // Journal of Thermal Spray Technology. 2020. Vol. 29, pp. 857–893. DOI: 10.1007/s11666-020-01047-0
20. Mauer G., Vaßen R., Stöver D. Plasma and particle temperature measurements in thermal spray: approaches and applications // Journal of Thermal Spray Technology. 2011. Vol. 3. No. 20, pp. 391-406. DOI: 10.1007/s11666-010-9603-z
21. Xue J., Huang M. Optimization of plasma spray process VIA orthogonal test design method, SVM, and improved PSO // International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing. 2017. Vol. 5. No. 3, pp. 153-158. DOI: 10.18178/ijmmm.2017.5.3.308
22. Lyphout C., Nylén P., Östergren L.G. Adhesion strength of HVOF sprayed IN718 coatings // Journal of Thermal Spray Technology. 2012. Vol. 21, pp. 86-95. DOI: 10.1007/s11666-011-9689-y
23. Ковалев А.А., Коновалов Д.П. Моделирование тепловых деформаций заготовки, возникающих в процессе сверления в ней отверстий // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26. № 1. С. 201- 211.
24. Ковалев А.А., Рогов Н.В. Оценка рассеяния значений показателя качества в зависимости от параметров технологического процесса // Вестник Московского авиационного института. 2021. Т. 28. № 1. С. 175-186. DOI: 10.34759/vst-2021-1-175-186
25. Иванов И.Э. Численное моделирование многофазных течений с большим содержанием дисперсной фазы // Вестник Московского авиационного института. 2009. Т. 16. № 2. С. 62-70.

References

1. Kalita V.I., Komlev D.I. *Plazmennye pokrytiya s nanokristallicheskoj i amorfnoj strukturoj* (Plasma coatings with nanocrystalline and amorphous structure), Moscow, Lider M, 2008, 388 p.
2. Kudinov V.V., Bobrov G.V. *Nanesenie pokrytii napyleniem. Teoriya, tekhnologiya i oborudovanie* (Spray coating. Theory, technology and equipment), Moscow, Metallurgiya, 1992, 432 p.
3. Khasui A., Morigaki O. *Naplavka i napylenie* (Surfacing and spraying), Moscow, Mashinostroenie, 1985, 240 p.
4. Puzryakov A.F. *Teoreticheskie osnovy tekhnologii plazmennogo napyleniya* (Theoretical basics of plasma spraying technology), Moscow, MGTU im. N.E. Bauman, 2008, 360 p.
5. Baldaev L.Kh. (ed) *Gazotermicheskoe napylenie* (Gas-thermal spraying), Moscow, Market DS, 2007, 344 p.
6. Il'yushenko A.F., Shevtsov A.I., Okovityi V.A. *Protessy formirovaniya gazotermicheskikh pokrytii i ikh modelirovanie* (Processes of thermal coatings forming and their modeling), Minsk, Belarusskaya nauka, 2011, 357 p.
7. Alavi S., Passandideh-Fard M., Mostaghimi J. Simulation of Semi-Molten Particle Impacts Including Heat Transfer and Phase Change. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2012, vol. 21, no. 6, pp. 1278–1293. DOI: 10.1007/s11666-012-9804-8
8. Ramachandran C.S., Balasubramanian V., Ananthapadmanabhan P.V. Multiobjective Optimization of Atmospheric Plasma Spray Process Parameters to Deposit Yttria-Stabilized Zirconia Coatings Using Response Surface Methodology. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2011, vol. 20, no. 3, pp. 590-607. DOI: 10.1007/s11666-010-9604-y
9. Bobzin K., Öte M., Knoch M.A., Alkhasli I. Macroscopic particle modeling in air plasma spraying. *Surface & Coatings Technology*, 2018, vol. 364, pp. 449-456. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2018.07.056
10. Nylén P., Hansbo A., Friis M. et al. Investigation of Particle In-flight Characteristics during Atmospheric Plasma Spraying of Yttria Stabilized ZrO₂: Part 2. Modeling. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2001, vol. 10, pp. 359–366. DOI: 10.1361/105996301770349448
11. Stummer M., Enzinger N. CFD Simulation of Particle Movement during Atmospheric Plasma Spraying. *12th International Seminar “Numerical Analysis of Weldability” (23–26 September 2018; Graz University of Technology, Seggau, Austria)*. DOI: 10.3217/978-3-85125-615-4-42
12. Zhang Y., Matthews S., Tran A.T.T., Hyland M. Effects of interfacial heat transfer, surface tension and contact angle on the formation of plasma-sprayed droplets through simulation study. *Surface & Coatings Technology*, 2016, vol. 307, pp. 807-816. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2016.09.066
13. Kovalev A.A., Krasko A.S. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 2021, no. 3, pp. 31-39. DOI: 10.31857/S0235711921030081

14. Sheludyak Yu.E., Kashporov L.Ya., Malinin L.A., Tsalkov V.N. *Teplofizicheskie svoystva komponentov goryuchikh system* (Thermo-physical properties of combustible systems components), Moscow, Informatsiya i tekhniko-ekonomicheskie issledovaniya, 1992, 184 p.
15. Kuz'min V.I., Gulyaev I.P., Kornienko E.E. et al. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Klimovskie chteniya – 2016. Perspektivnye napravleniya razvitiya aviadvigateloestroyeniya" (20 October 2016; Sankt-Peterburg)*, St. Petersburg, Skifiya-print, 2016, pp. 309–316.
16. Zinov'ev V.E. *Teplofizicheskie svoystva metallov pri vysokikh temperaturakh. Spravochnoe izdanie* (Thermophysical properties of materials at high temperatures. Reference edition), Moscow, Metallurgiya, 1989, 382 p.
17. Kharlamov Yu.A., Borisov Yu.S. *Avtomaticheskaya svarka*, 2001, no. 6, pp. 19–26.
18. Tillmann W., Hagen L., Schaak C. et al. Adhesion of HVOF-sprayed WC-Co coatings on 316L substrates processed by SLM. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2020, vol. 29, pp. 1396–1409. DOI: 10.1007/s11666-020-01081-y
19. Meghwal A., Anupam A., Murty B.S. et al. Thermal spray high-entropy alloy coatings: a review. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2020, vol. 29, pp. 857–893. DOI: 10.1007/s11666-020-01047-0
20. Mauer G., Vaßen R., Stöver D. Plasma and particle temperature measurements in thermal spray: approaches and applications. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2011, vol. 3, no. 20, pp. 391–406. DOI: 10.1007/s11666-010-9603-z
21. Xue J., Huang M. Optimization of plasma spray process VIA orthogonal test design method, SVM, and improved PSO. *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*, 2017, vol. 5, no. 3, pp. 153–158. DOI: 10.18178/ijmmm.2017.5.3.308
22. Lyphout C., Nylén P., Östergren L.G. Adhesion strength of HVOF sprayed IN718 coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2012, vol. 21, pp. 86–95. DOI: 10.1007/s11666-011-9689-y
23. Kovalev A.A., Konovalov D.P. Workpiece thermal deformations simulation occurring while holes drilling process. *Aerospace MAI Journal*, 2019, vol. 26, no. 1, pp. 201–211.
24. Kovalev A.A., Rogov N.V. Evaluation of quality indicator dispersion depending on technological process parameters. *Aerospace MAI Journal*, 2021, vol. 28, no. 1, pp. 175–186. DOI: 10.34759/vst-2021-1-175-186
25. Ivanov I.E. Numerical simulation of multiphase flows with large volume fraction of dispersed phase. *Aerospace MAI Journal*, 2009, vol. 16, no. 2, pp. 62–70.

Статья поступила в редакцию 01.07.2021; одобрена после рецензирования 18.10.2021; принята к публикации 18.10.2021.

The article was submitted on 01.07.2021; approved after reviewing on 18.10.2021; accepted for publication on 18.10.2021.