

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.793
DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-4-148-156



МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ ПОРОШКОВЫХ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

Бодров Е.Г.¹, Серебряков И.С.², Латфулина Ю.С.³,
Напримерова Е.Д.³, Мясоедов В.А.³, Самодурова М.Н.³

¹ АО «КОНАР», Челябинск, Россия

² SARDOU SA, Сен-Суппле, Франция

³ Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Постановка задачи. В статье представлены результаты моделирования процесса холодного газодинамического напыления порошковых покрытий. Этот процесс заключается в формировании покрытия за счет деформации металлических частиц при высокоскоростном столкновении с твердой поверхностью. Сложность взаимодействия частиц и подложки при варьировании параметров процесса холодного газодинамического напыления обуславливает необходимость использования математического моделирования для прогнозирования возможности формирования покрытий. **Цель работы.** Разработать математическую модель потока газа и движения частиц при холодном газодинамическом напылении с учетом специфики существующих областей газового потока и размера частиц порошка. **Используемые методы.** Для расчета параметров газа внутри сопла Лавала использованы изокэнтронные формулы; расчет параметров напыляемых производили с учетом значений числа Маха и числа Рейнольдса. **Новизна полученных результатов.** Разработана математическая модель движения потока газа в процессе холодного газодинамического напыления. Данная модель позволяет точно рассчитывать расход газа в коротких хорошо профилированных соплах со сходящимся дозвуковым потоком. Разработана математическая модель для расчета параметров напыляемых частиц и определения их напыляемости. Теоретически показано, что параметры напыления в процессе холодного газодинамического напыления могут быть рассчитаны с учетом нормированных параметров скорости или энергии частиц. **Практическая значимость.** На основании разработанных математических моделей произведен расчет параметров холодного газодинамического напыления, влияющих на свойства получаемых покрытий для частиц размером от 5 до 45 мкм. Получены закономерности, определяющие возможность нанесения порошка определенной фракции, а также зависимости скорости и температуры частиц от их размера. Полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования параметров холодного газодинамического напыления материалов с низкой температурой плавления.

Ключевые слова: холодное газодинамическое напыление, математическое моделирование, газовый поток, порошковый материал, размер частиц, температура частиц порошка, скорость частиц порошка, эффективность напыления

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (государственное задание на выполнение фундаментальных научных исследований №FENU-2023-0013 (2023013ГЗ)).

© Бодров Е.Г., Серебряков И.С., Латфулина Ю.С., Напримерова Е.Д., Мясоедов В.А., Самодурова М.Н., 2023

Для цитирования

Математическое моделирование процесса холодного газодинамического напыления порошковых цветных металлов / Бодров Е.Г., Серебряков И.С., Латфулина Ю.С., Напримерова Е.Д., Мясоедов В.А., Самодурова М.Н. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №4. С. 148-156. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-148-156>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESS OF COLD GAS DYNAMIC SPRAYING OF POWDER NON-FERROUS METALS

Bodrov E.G.¹, Serebriakov I.S.², Latfulina Yu.S.³,
Naprimeroва E.D.³, Myasoedov V.A.³, Samodurova M.N.³

¹ KONAR JSC, Chelyabinsk, Russia

² SARDOU SA, Saint-Souplets, France

³ South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Problem Statement. The paper presents the results of modeling the process of cold gas dynamic spraying of powder coatings. This process involves the deformation of metal particles by high-speed collision with a solid surface. The complexity of the interaction between particles and the substrate, when varying the parameters of the cold gas dynamic spraying process, contributes to using the mathematical modeling to predict the possibility of forming coatings. **Objectives.** The research is aimed at developing the mathematical model of gas flow and particle movement during cold gas dynamic spraying, factoring into the peculiarities of existing areas of gas flow and the size of powder particles. **Methods Applied.** Isentropic formulas were used to calculate the gas parameters inside the de Laval nozzle; the sprayed particle parameters were calculated, factoring into the values of the Mach number and the Reynolds number. **Originality.** The authors developed the mathematical model of the movement of gas flow in the process of cold gas dynamic spraying. This model is used to calculate accurately the gas consumption in short, well-contoured nozzles with a converging subsonic flow. The mathematical model was developed to calculate the parameters of sprayed particles and determine their sprayability. It has been shown theoretically that the spraying parameters in the process of cold gas dynamic spraying can be calculated factoring into the regulated parameters of particle speed or energy. **Practical Relevance.** Based on the developed mathematical models, the authors calculated the parameters of cold gas dynamic spraying, which have effect on the properties of the resulting coatings for particles ranging in size from 5 to 45 micrometers. The paper contains the obtained regularities that determine the possibility to apply powder of a certain fraction, as well as the dependence between speed and temperature of particles and their size. The results obtained can be used to predict the parameters of cold gas dynamic spraying of materials with low melting temperature.

Keywords: cold gas dynamic spraying, mathematical modeling, gas flow, powder material, particle size, powder particle temperature, powder particle speed, spraying efficiency

This research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (the state order for basic research, grant FENU-2023-0013).

For citation

Bodrov E.G., Serebriakov I.S., Latfulina Yu.S., Naprimeroва E.D., Myasoedov V.A., Samodurova M.N. Mathematical Modeling of the Process of Cold Gas Dynamic Spraying of Powder Non-Ferrous Metals. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 4, pp. 148-156. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-148-156>

Обоснование важности применения математического моделирования

При холодном напылении частицы перед ударом о подложку ускоряются в предварительно нагретом газовом потоке высокого давления, проходящем через сопло типа де Лавала. В отличие от традиционного термического напыления, частицы перед ударом нагреваются незначительно. Скорость удара находится в диапазоне 200-1200 м/с и зависит в основном от геометрии сопла, размера и формы частиц, типа технологического газа, а также от таких параметров технологического газа, как давление и температура. Частицы, попадающие на поверхность, образуют плотное покрытие с малым содержанием оксидов. Связь при холодном напылении возникает из-за деформации частиц

при ударе и зависит от условий столкновения и различных свойств порошка.

До настоящего времени основное внимание при оптимизации процесса холодного распыления уделялось разработке форм сопел, обеспечивающих более эффективное ускорение частиц. В большинстве случаев распыляемые порошки настраивались на тонкий гранулометрический состав, поскольку только мелкие частицы достигают требуемых для склеивания высоких скоростей. В более поздних публикациях также показано, что стратегия использования как можно более мелких частиц для достижения максимальных скоростей частиц не является эффективной для достижения оптимального качества покрытия, поскольку пренебрегаются эффекты размера, которые могут быть очень важны для сцепления соударяющихся частиц.

Эти размерные эффекты могут быть основаны на динамических эффектах, таких как очень быстрая тепловая компенсация локализованного тепла, выделяемого при ударе, а также повышение прочности за счет деформационного упрочнения. Кроме того, роль таких эффектов может играть и более высокое отношение поверхности к объему частиц меньшего размера.

Оптимизация микроструктуры и свойств покрытия требует систематического варьирования условий напыления, что особенно для неизвестных напыляемых материалов может быть трудоемким и дорогостоящим. Для оптимизации процесса используется обобщенное описание ударных явлений, содержащее влияние размера частиц и температуры их соударения на склеивание. Это обобщенное описание дает несколько простых уравнений для оценки оптимальных условий удара, работающих с общими свойствами материала, которые доступны для большинства материалов. Эти рассчитанные условия воздействия реализуются с помощью недавно разработанного блока управления температурой, встроенного в традиционное оборудование для холодного распыления.

Температура и скорость металлических частиц в процессе холодного газодинамического напыления имеют большое значение, так как они влияют на их способность к адгезии на подложке. Частицы должны деформироваться и проявлять адиабатические явления неустойчивости вблизи поверхности, чтобы обеспечить прочное сцепление. Однако важно соблюдать баланс между скоростью столкновения частиц и их тепловой энергией. Экспериментальные методы измерения скорости частиц могут иметь ограничения в измерении малых частиц размером около 30 мкм при ожидаемых скоростях от 500 до 900 м/с. Для получения точных значений скорости и температуры частиц предлагается использовать численное моделирование.

Основа для моделирования потоков газа и частиц

Известно, что скорость звука зависит от температуры газа. Таким образом, повышение температуры технологического газа при холодном распылении, соответственно, приводит к увеличению скорости газа в сопле. Достижимая скорость частиц зависит в основном от скорости ускоряемого газового потока и, во вторую очередь, от его плотности. Ограничение температуры газа, связанное с закупоркой сопла или теплостойкостью материала сопла, является основным препятствием для дальнейшего развития процесса холодного распыления, так как это ограничивает достижимую скорость соударения частиц и, как следствие, достижимую температуру соударения частиц. Повышение температуры соударения частиц приводит к снижению критической скорости напыляемого материала вследствие термического размягчения. Критическая скорость снижается по мере увеличения размера частиц и, в конце концов, выходит на плато. Скорость столкновения частиц имеет максимум, так как очень

маленькие частицы ускоряются до высоких скоростей, но замедляются в ударной волне перед основой. Более крупные частицы ускоряются меньше в газовом потоке и, следовательно, имеют меньшую скорость столкновения. Там, где ударная скорость выше критической, частицы слипаются при идеальных условиях столкновения (вертикальное столкновение с плоской поверхностью). Между пересечениями критической скорости и скорости удара находится оптимальная фракция частиц для данного режима распыления. Для получения наилучшего сцепления частиц и качества покрытия необходимо стремиться использовать фракцию порошка, находящуюся в центре этого оптимального распределения, а также увеличивать расстояние между двумя линиями в этой области.

Скорость соударения частиц может быть увеличена за счет конструкции сопла, более высокой температуры газа или более высокого давления газа. Критическая скорость может быть уменьшена за счет более высокой температуры соударения частиц и большего размера частиц. Качество покрытия и сцепление медных покрытий, полученных холодным распылением, могут быть значительно улучшены за счет использования новых стратегий оптимизации. Для этого все скорости и температуры частиц определяются с помощью газодинамических расчетов. В этих расчетах расширение газа в сопле принимается изотропным. Замедление частиц перед подложкой (эффект носового удара) реализуется с помощью простого приближения.

Из-за малого размера используемых порошков (менее 30 мкм) сложно точно измерить скорость частиц, а измерение температуры с использованием современных методов полностью невозможно. Таким образом, необходимо использовать моделирование движения газового потока, содержащего порошковые частицы.

В настоящее время для расчета газовых потоков используется программное обеспечение FLUENT на основе численного решения уравнений Навье-Стокса. Моделирование потока во FLUENT применяется к относительно длинным соплам, которые характерны для холодного газодинамического напыления. Процесс расчета может занимать несколько часов или даже дней. Однако в контексте процесса холодного газодинамического напыления параметры газового потока не всегда являются наиболее важными. Вместо этого первостепенное значение имеют параметры распыляемых частиц, такие как их температура и скорость на выходе из сопла (для сравнения с экспериментальными данными) и при контакте с подложкой (для оценки вероятности формирования покрытия). Целью данного исследования является разработка модели и соответствующего программного обеспечения, позволяющего выполнить эти расчеты быстро и с высокой точностью.

Уравнения идеального газа могут быть использованы для быстрого расчета параметров газового потока и применимы для решения широкого круга задач, связанных с исследованием дозвуковых и сверхзвуковых течений газа. Однако идеальные уравнения газа в их

первоначальной форме не подходят для моделирования процессов холодного газодинамического напыления из-за существования пограничного слоя у стенки сопла и высоких скоростей возмущений в сжатом слое, образующемся на поверхности подложки [1-5]. Эти уравнения можно было бы исправить с помощью эмпирических приближений.

В общем случае моделирование движения газового потока включает в себя следующие области:

1. Сходящаяся (дозвуковая) область – без пограничного слоя, используются исходные идеальные уравнения газа.

2. Расходящаяся (сверхзвуковая) область – учитывается пограничный слой при движении газа в сопле.

3. Область свободной струи – используется эмпирическое уравнение изобарного потока.

4. Сжатый слой – особая область с высокими колебаниями числа Маха, где идеальные уравнения газа неприменимы [6, 7].

Вычисление потока газа и движения частиц будет производиться отдельно без учета влияния твердой фазы на газовую фазу, поскольку массовый расход частиц значительно меньше, чем массовый расход газа.

Математическое моделирование движения потока газа

Так называемые изоэнтروпийные формулы могут использоваться в качестве приближения для расчета параметров газа внутри сопла Лавала. Эти формулы получены на основе сохранения энтальпии, законов газовой динамики, сохранения энтропии и уравнения идеального состояния газа. Рассматривается только случай одномерного потока, то есть параметры газа зависят только от продольной координаты.

Сначала для расчета задается самое узкое сечение сопла S_{cr} , которое называется критическим сечением. Далее задается форма сходящегося и расходящегося участков. Обычно эта форма представляет собой конус с постоянным сечением или задается специальным профилем $S(z)$, где z – продольная координата, начинающаяся в сходящемся участке. Вместо абсолютной скорости газового потока в газовой динамике используется коэффициент скорости k , который является отношением между абсолютной скоростью газа и критической скоростью a_{cr} , определенной локальной температурой торможения T_0 :

$$a_{cr} = \sqrt{\frac{2k}{k+1} R_a T_0}, \quad (1)$$

где k – удельный коэффициент теплопередачи газа (1,4 – для воздуха и азота, 1,67 – для гелия); R_a – удельный газовый показатель, который определяется как отношение универсальной газовой константы к молекулярной массе газа.

Используется число Маха, которое представляет собой отношение абсолютной скорости газа к локальной скорости звука:

$$M = \frac{v}{a}, \quad (2)$$

где $a = \sqrt{kR_a T}$.

Отношение между коэффициентом скорости и числом Маха можно выводить с использованием любого из этих чисел:

$$\lambda = \frac{M}{\sqrt{\frac{2}{(k+1)\left(1 + \frac{k-1}{2} M^2\right)}}}, \quad (3)$$

$$M = \frac{\lambda}{\sqrt{\frac{k+1}{2}\left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2\right)}}. \quad (4)$$

Большинство уравнений записывается более удобно, если использовать коэффициент скорости вместо числа Маха, поэтому для настоящих расчетов выбран этот метод [9-11].

Распределение коэффициента скорости вдоль сопла вычисляется следующим образом:

$$\frac{S_{cr}}{S(z)} = \lambda(z) \left(\frac{1 - b\lambda(z)^2}{1 - b} \right)^{\frac{1}{k-1}}, \quad (5)$$

где
$$b = \frac{k-1}{k+1}. \quad (6)$$

Следует отметить, что скорость потока не может быть напрямую получена из этого уравнения. Вместо этого необходимо использовать методы решения нелинейных уравнений. После определения коэффициента скорости остальные параметры газа могут быть легко определены с использованием следующих формул:

$$\frac{T}{T_0} = 1 - b\lambda^2; \quad (7)$$

$$\frac{p}{p_0} = \left(1 - b\lambda^2\right)^{\frac{1}{k-1}}; \quad (8)$$

$$\frac{p}{p_0} = \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^k, \quad (9)$$

где T – локальная температура газа, К; ρ – локальная плотность газа, кг/м³; p – локальное давление, МПа. Параметры, помеченные индексом «0», являются параметрами стагнации.

Заметим, что изоэнтропийные потоки сохраняют параметры стагнации. Таким образом, достаточно вычислить их значения на входе в сопло и использовать для дальнейших расчетов как константы. Кроме того,

давление и температура в предкамере обычно близки к давлению и температуре неподвижного газа. Таким образом, остается только вычислить плотность торможения, используя уравнение состояния идеального газа:

$$\rho = \frac{p}{R_a T}. \quad (10)$$

Вышеописанная модель может точно рассчитывать расход газа в коротких хорошо профилированных соплах со сходящимся дозвуковым потоком. Для повышения точности расчетов для длинных сопел, используемых в холодном газодинамическом напылении, необходимо учесть трение газа о стенки сопла.

Модель, основанная на задаче обтекания плоской пластины, хорошо изучена экспериментально и теоретически. В условиях обтекания плоской пластины пограничный слой начинает расти с переднего края. Для этого классическая замкнутая полумпирическая модель строится на основе уравнения импульсов Кармана и хорошо описывается в работе [8].

Важной частью является моделирование потока на цели. Рассмотрим удар сверхзвукового потока на нормально расположенную плоскость. Газ замедляется и возникает обратное движение перед поверхностью цели. Переход от сверхзвукового к дозвуковому режиму происходит из-за столкновения, происходящего на определенном расстоянии z_w от поверхности цели. Между плоскостью цели и плоскостью ударного фронта образуется слой газа с высоким давлением и высокой плотностью. Вероятно, мелкие частицы, которые проходят через этот сжатый слой, теряют часть своей скорости. Чем толще сжатый слой, тем больше потеря скорости.

Определить распределение числа Маха (отношение скорости течения к скорости звука в среде) в сжатом слое сложно. В исследовании используется известный метод аппроксимации полиномами для определения чисел Маха и их производных между двумя точками. Начальная точка выбирается на оси струи в точке удара.

На основе обширных экспериментальных данных [12-18] определяют однородность градиента скорости в начальной точке потока. Однородность подразумевает, что градиенты скорости одинаковы в соответствии с законом сохранения циркуляции скорости в

точке торможения, то есть $\left| \frac{\partial M}{\partial y} \right| = \left| \frac{\partial M}{\partial z} \right|$.

Расчет параметров частиц в потоке газа

Скорость частиц. Скорость частиц в потоке рассчитывали по формуле

$$m_p v_p \frac{dv_p}{dz} = C_x \frac{\rho(v-v_p)^2}{2} S_{mid}. \quad (11)$$

Формула также учитывает значения числа Маха и числа Рейнольдса:

$$M_p = \frac{\rho(v-v_p)^2 d_p}{a}; \quad (12)$$

$$Re_p = \frac{\rho(v-v_p)^2 d_p}{\mu}. \quad (13)$$

Значение коэффициента сопротивления C_x может быть найдено при помощи приближения Хендерсона.

Инертные законы нагрева или охлаждения применяются, когда температура частиц меньше температуры испарения T_{vap} и после того, как часть летучей фракции частицы $f_{v,0}$ была поглощена. Эти условия могут быть записаны как

$$T_p < T_{vap}, \quad (14)$$

$$m_p \leq (1 - f_{v,0}) m_{p,0}, \quad (15)$$

где T_p – температура частицы, К; $m_{p,0}$ – начальная масса частицы, г; m_p – текущая масса частицы, г.

Используя простой баланс тепла, связанный с температурой частиц $T_p(t)$, с конвективным теплообменом и поглощением/испусканием излучения на поверхности частицы, получим

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T_\infty - T_p) + \epsilon_p A_p \sigma (\theta_R^4 - T_p^4). \quad (16)$$

По расчетам для частиц диаметром менее 36 мкм градиент температуры отсутствует.

Критическая скорость частиц. Важным параметром для получения покрытий методом холодного газодинамического напыления является критическая скорость напыления частиц меди, которая вычисляется по формуле

$$v_{cr} = \sqrt{\frac{a\sigma}{\rho} + b C_p (T_m - T_p)}, \quad (17)$$

где $a = 4$; $b = 0,25$; $\rho = 8790$ кг/м³; $C_p = 390 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$; $T_m = 1357$ К; T_p – температура частицы, зависящая от температуры газа и размера частицы, К; σ – предел прочности частицы, зависящий от температуры газа и температуры частицы, МПа.

Параметры напыляемости частиц. Ещё одним важным параметром является коэффициент η , который определяет эффективность процесса холодного газодинамического напыления в зависимости от температуры потока газа и скорости частицы:

$$\eta = \frac{v_{imp}}{v_{cr}}. \quad (18)$$

Соотношение между свойствами и скоростями не является универсальным и лучше всего подходит для

частиц с низкой температурой. Например, при приближении к температуре плавления критическая скорость стремится к нулю, и, следовательно, соотношение скоростей становится бесконечно велико. Поэтому при более высоких температурах данные могут быть лучше поняты с учётом энергетического параметра. В любом случае параметры свойств напыления в холодном газодинамическом напылении могут быть рассчитаны с учётом этих нормированных параметров скорости или энергии.

Результаты моделирования

Для оценки возможности напыления порошка были проведены аналогичные расчеты для частиц размером от 5 до 45 микрометров. В результате был построен ряд кривых, показывающих возможность нанесения порошка определенной фракции, а также зависимости скорости и температуры частиц от их размера.

На рис. 1 показаны линии зависимости критической скорости от температуры частицы, а также точками показаны положения частиц в зависимости от скорости и температуры частицы.

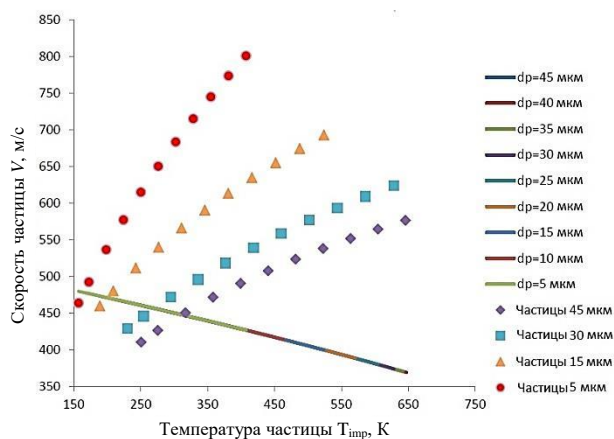


Рис. 1. Зависимость скорости напыляемых частиц от их температуры в процессе холодного газодинамического напыления

Fig. 1. Dependence between speed of sprayed particles and their temperature in the process of cold gas dynamic spraying

Очевидно, что точки частиц, находящиеся выше линий критических скоростей, будут напыляться на подложку.

На рис. 2 показаны графики изменения температуры и скорости частицы в зависимости от её размера. Из полученных данных видно, что по мере увеличения размера частицы ее скорость полета уменьшается, а температура, до которой она нагревается в газовом потоке, возрастает. Можно также сказать, что чем выше температура газового потока, тем выше скорость частицы и, следовательно, выше ее способность образовывать связь с подложкой. Это также видно на графике на рис. 3. Исходя из этого, следует, что с увеличением температуры газа увеличивается эффективность напыления частиц.

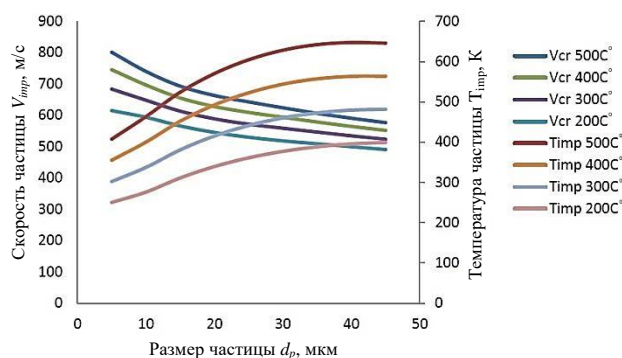


Рис. 2. Изменение температуры и скорости частицы в зависимости от её размера в процессе холодного газодинамического напыления

Fig. 2. Change in temperature and speed of a particle depending on its size in the process of cold gas dynamic spraying

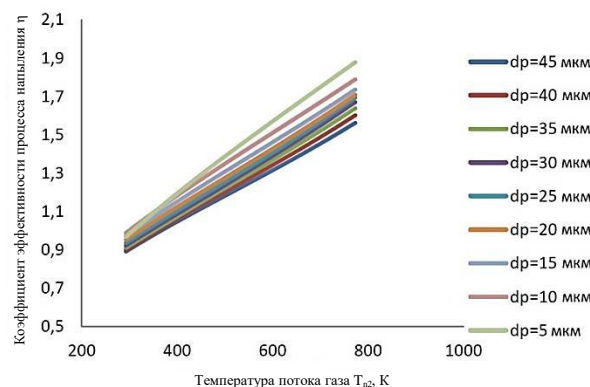


Рис. 3. Зависимость параметра эффективности напыления частицы от температуры потока газа в процессе холодного газодинамического напыления

Fig. 3. Dependence between the particle spraying efficiency parameter and the gas flow temperature in the process of cold gas dynamic spraying

Заключение

Особенности процесса холодного газодинамического напыления и происходящие в процессе формирования покрытия взаимодействия напыляемого порошка с подложкой являются достаточно специфическими. Если скорость столкновения частиц превышает определенный критический уровень, это вызывает значительную пластическую деформацию частиц и иногда поверхности подложки. Это приводит к разрушению тонких пленок на поверхности частиц и подложки, что способствует тесному контакту между химически активными материалами частиц и подложки. В результате этого данный метод нанесения покрытий характеризуется достаточно высокой прочностью сцепления покрытия с подложкой. Затем частицы ускоряются и нагреваются в сверхзвуковом распылительном сопле посредством высокоскоростной газовой струи. В газовом потоке частицы уско-

ряются и нагреваются из-за их взаимодействия с газовой фазой. Все эти факторы являются основанием для проведения глубоких теоретических исследований для понимания процессов взаимодействия разнородных по фазовому составу материалов при высокой скорости их взаимодействия.

Для обоснования режимов холодного газодинамического напыления с целью получения покрытий из легкоплавких материалов разработаны математические модели, позволяющие теоретически описать как газовый поток, так и поведение порошковых частиц в высокоскоростной газовой среде. Отличительной особенностью разработанных моделей является возможность получения количественных зависимостей поведения порошковых частиц широкого диапазона размеров в процессе холодного газодинамического напыления. Полученные результаты являются основанием для разработки технологических режимов холодного газодинамического напыления для получения покрытий различного функционального назначения.

Список источников

1. Kumar S., Reddy Sai Kiran, Joshi S.V. Microstructure and performance of cold sprayed Al-SiC composite coatings with high fraction of particulates // *Surface & Coatings Technology*. 2017, vol. 318, pp. 62-71.
2. Onur Meydanoglu, Bertrand Jodoin, E. Sabri Kayali. Microstructure, mechanical properties and corrosion performance of 7075 Al matrix ceramic particle reinforced composite coatings produced by the cold gas dynamic spraying process // *Surface and Coatings Technology*. 2013, vol. 235, pp. 108-116.
3. The effect of metal coatings on the interfacial bonding strength of ceramics to copper in sintered Cu-SiC composites / Dariusz M. Jarzabka, Michał Milczarek, Tomasz Wojciechowski, Cezary Dziekoński, Marcin Chmielewski // *Ceramics International*. 2017, no. 43, pp. 5283-5291.
4. Cold spraying: from process fundamentals towards advanced applications / S. Grigoriev, A. Okunkova, A. Sova, P. Bertrand, I. Smurov // *Surf. Coat. Technol.* 2015, no. 268, pp. 77-84.
5. Thermal conductivity of graphite flakes-SiC particles/metal composites / R. Prieto, J.M. Molina, J. Narciso, E. Louis // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2011, no. 42, pp. 1970-1977.
6. Tazegul O., Dylmishi V., Cimenoglu H. Copper matrix composite coatings produced by cold spraying process for electrical applications // *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2016, vol. 16, iss. 3, pp. 344-350.
7. Corrosion protection and electrical conductivity of copper coatings deposited by low-pressure cold spraying / M. Winnicki, A. Małachowska, A. Baszczuk, M. Rutkowska-Gorczyca, D. Kukla, M. Lachowicz, A. Ambroziak // *Surface & Coatings Technology*. 2017, vol. 318, pp. 90-98.
8. Tribological Behavior of a Cold-Sprayed Cu-MoS₂ Composite Coating During Dry Sliding Wear / Zhang Y., Michael Shockley J., Vo P. et al. // *Tribol Lett.* 2016, no. 62, Article 9.
9. Ternary Cu-CNT-AlN composite coatings consolidated by cold spray deposition of mechanically alloyed powders / E.J.T. Pialago, O.K. Kwon, M.-S. Kim, C.W. Park // *Journal of Alloys and Compounds*. 2015, vol. 650, pp. 199-209.
10. Microstructure and tribological behavior of copper and composite copper+alumina cold sprayed coatings for various alumina contents / Kostoula I. Triantou, Dimitris I. Pantelis, V. Guipont, M. Jeandin // *Wear*. 2015, vol. 336, pp. 96-107.
11. Boron Carbide (B₄C) – Properties and Information about Boron Carbide [Электронный ресурс] // *The AZo Journal of Materials Online*: [сайт]. 2001. URL: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=75> (дата обращения: 17.10.2023).
12. Nucleate pool boiling of R134a on cold sprayed Cu-CNT-SiC and Cu-CNT-AlN composite coatings / E.J.T. Pialago, O.K. Kwon, J.S. Jin, C.W. Park // *Applied Thermal Engineering*. 2016, vol. 103, pp. 684-694.
13. Electrochemical corrosion and mathematical model of cold spray Cu-Cu₂O coating in NaCl solution - Part I: Tafel polarization region model / D. Rui, L. Xiangbo, W. Jia, X. Likun // *Int. J. Electrochem. Sci.* 2013, no. 8, pp. 5902-5924.
14. Макейкин А.М. Методика планирования многофакторного эксперимента влияния режимов холодного газодинамического напыления на коэффициент использования материала // *Вестник науки*. 2023. №7 (64). С. 275-279.
15. Волков А.О. Обзор холодного газодинамического напыления: проблемы и перспективы // *Автомобильный транспорт*. 2019. №45. С. 91-102.
16. Холодное газодинамическое напыление покрытий (обзор) / Козлов И.А., Лещев К.А., Никифоров А.А., Демин С.А. // *Труды ВИАМ*. 2020. №8(90). С. 77-93.
17. Реализация процесса нанесения покрытия медь-вольфрам методом холодного газодинамического напыления / Латфулина Ю.С., Дубенская М., Самодурова М.Н., Трофимов Е.А., Барков Л.А. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова*. 2021. №2. С. 40-49.
18. Структурно-фазовые превращения в покрытиях на основе частиц меди и цинка, нанесенном газодинамическим напылением / В.Е. Архипов, Т.И. Муравьева, М.С. Пугачев, О.О. Щербакова // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2020. №4(778). С. 32-36.

References

1. Kumar S., Reddy Sai Kiran, Joshi S.V. Microstructure and performance of cold sprayed Al-SiC composite coatings with high fraction of particulates. *Surface and Coatings Technology*. 2017;318:62-71.
2. Onur Meydanoglu, Bertrand Jodoin, E. Sabri Kayali.

- Microstructure, mechanical properties and corrosion performance of 7075 Al matrix ceramic particle reinforced composite coatings produced by the cold gas dynamic spraying process. *Surface and Coatings Technology*. 2013;235:108-116.
- Dariusz M. Jarzabek, Michał Milczarek, Tomasz Wojciechowski, Cezary Dziekoński, Marcin Chmielewski. The effect of metal coatings on the interfacial bonding strength of ceramics to copper in sintered Cu-SiC composites. *Ceramics International*. 2017;43:5283-5291.
 - Grigoriev S., Okunkova A., Sova A., Bertrand P., Smurov I. Cold spraying: from process fundamentals towards advanced applications. *Surf. Coat. Technol.* 2015;268:77-84.
 - Prieto R., Molina J.M., Narciso J., Louis E. Thermal conductivity of graphite flakes-SiC particles/metal composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2011;42:1970-1977.
 - Tazegul O., Dylmishi V., Cimenoglu H. Copper matrix composite coatings produced by cold spraying process for electrical applications. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2016;16(3):344-350.
 - Winnicki M., Małachowska A., Baszczuk A., Rutkowska-Gorczyca M., Kukla D., Lachowicz M., Ambroziak A. Corrosion protection and electrical conductivity of copper coatings deposited by low-pressure cold spraying. *Surface and Coatings Technology*. 2017;318:90-98.
 - Zhang Y., Michael Shockley J., Vo P. et al. Tribological behavior of a cold-sprayed Cu-MoS₂ composite coating during dry sliding wear. *Tribology Letters*. 2016;62:9. <https://doi.org/10.1007/s11249-016-0646-2>
 - Pialago E.J.T., Kwon O.K., Kim M.-S., Park C.W. Ternary Cu-CNT-AlN composite coatings consolidated by cold spray deposition of mechanically alloyed powders. *Journal of Alloys and Compounds*. 2015;650:199-209.
 - Kostoula I. Triantou, Dimitris I. Pantelis, Guipont V., Jeandin M. Microstructure and tribological behavior of copper and composite copper+alumina cold sprayed coatings for various alumina contents. *Wear*. 2015;336-337:96-107.
 - Boron carbide (B₄C) – Properties and information about boron carbide. The AZo Journal of Materials Online. Available at: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=75> (Accessed on October 17, 2023).
 - Pialago E.J.T., Kwon O.K., Jin J.S., Park C.W. Nucleate pool boiling of R134a on cold sprayed Cu-CNT-SiC and Cu-CNT-AlN composite coatings. *Applied Thermal Engineering*. 2016;103:684-694.
 - Rui D., Xiangbo L., Jia W., Likun X. Electrochemical corrosion and mathematical model of cold spray Cu-Cu₂O coating in NaCl solution - Part I: Tafel polarization region model. *Int. J. Electrochem. Sci.* 2013;8:5902-5924.
 - Makeykin A.M. Methodology for planning multifactorial experiment of influence of cold gas dynamic spraying modes on the material utilization factor. *Vestnik nauki [Bulletin of Science]*. 2023;(7(64)):275-279. (In Russ.)
 - Volkov A.O. Overview of cold gas dynamic spraying: problems and prospects. *Avtomobilnyi transport [Automobile Transport]*. 2019;(45):91-102. (In Russ.)
 - Kozlov I.A., Leshchev K.A., Nikiforov A.A., Demin S.A. Cold gas dynamic spraying of coatings (review). *Trudy VIAM [Proceedings of VIAM]*. 2020;(8(90)):77-93. (In Russ.)
 - Latfulina Yu.S., Doubenskaia M., Samodurova M.N., Trofimov E.A., Barkov L.A. Implementation of a copper-tungsten coating by cold gas dynamic spraying. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]*. 2021;(2):40-49. (In Russ.)
 - Arkipov V.E., Muravyeva T.I., Pugachev M.S., Shcherbakova O.O. Structural-phase transformations in the coating based on copper and zinc particles applied by gas dynamic spraying. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov [Metal Science and Heat Treatment]*. 2020;(4(778)):32-36. (In Russ.)

Поступила 04.10.2023; принята к публикации 16.11.2023; опубликована 25.12.2023
Submitted 04/10/2023; revised 16/11/2023; published 25/12/2023

Бодров Евгений Геннадьевич – технический директор, АО «КОНАР», Челябинск, Россия.

Email: bodrov.evgeniy@konar.ru.

Серебряков Иван Сергеевич – кандидат технических наук, инженер, SARDOU SA,

Сен-Суппле, Франция. Email: ivan-serebr@yandex.ru.

Латфулина Юлия Сергеевна – научный сотрудник,

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.

Email: latfulina174@gmail.com. ORCID 0000-0002-2128-3965

Напримерова Елена Дмитриевна – аспирант,

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.

Email: naprimerovaed@susu.ru.

Мясоедов Вячеслав Александрович – студент,

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.

Email: vmyasoedov74@mail.ru.

Самодурова Марина Николаевна – доктор технических наук, профессор,
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
Email: samodurovamn@susu.ru. ORCID 0000-0002-1505-1068

Evgeniy G. Bodrov – Technical Director,
KONAR JSC, Chelyabinsk, Russia.
Email: bodrov.evgeniy@konar.ru

Ivan S. Serebriakov – PhD (Eng.), Engineer,
SARDOU SA, Saint-Soupplets, France.
Email: ivan-serebr@yandex.ru.

Yuliya S. Latfulina – Research Associate,
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: latfulina174@gmail.com. ORCID 0000-0002-2128-3965

Elena D. Naprimerova – postgraduate student,
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: naprimerovaed@susu.ru.

Vyacheslav A. Myasoedov – student,
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: vmyasoedov74@mail.ru.

Marina N. Samodurova – DrSc (Eng.), Professor,
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: samodurovamn@susu.ru. ORCID 0000-0002-1505-1068