

А. В. Воронцовский, В. И. Колпаков,
Л. А. Филимонов, А. А. Ходыкин

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ПОКРЫТИЙ ПРИ СВЕРХЗВУКОВОМ ГАЗОПЛАМЕННОМ НАПЫЛЕНИИ

Рассмотрены особенности численного моделирования процессов формирования металлических покрытий при сверхзвуковом газопламенном напылении. Проведено численное исследование соударения с преградой одиночной частицы, движущейся в диапазоне скоростей 500...1000 м/с. Для описания процесса взаимодействия использована модель идеальной упругопластической среды. Выполнен анализ динамики ударного взаимодействия частиц с преградой и формирования в ней каверн. Показано, что в процессе деформирования частица принимает дискообразную форму со сложным поперечным сечением. Получена картина изменения формы частицы, глубины ее внедрения в преграду и высоты деформированной частицы над поверхностью преграды.

E-mail: voron@mx.bmstu.ru; kolpakov@sm.bmstu.ru

Ключевые слова: газопламенное напыление, металлическое покрытие, математическое моделирование.

Сверхзвуковое газопламенное напыление (СГН) покрытий — это новый высокоэффективный метод обработки поверхности деталей, который позволяет также восстанавливать изношенные детали и наносить защитные покрытия различного типа. Сущность процесса состоит в ускорении и нагреве частиц порошкообразного материала сверхзвуковой высокотемпературной газовой струей с последующим нанесением их на поверхность обрабатываемой детали.

В состав технологической установки СГН обычно входят система подачи напыляемого порошкообразного материала и устройство для создания сверхзвукового газового потока, в качестве которого используется камера сгорания с соплом Лавала. В камеру сгорания подаются топливные компоненты, а образующиеся высокотемпературные газобразные продукты истекают через сопло, формируя сверхзвуковую струю.

Для получения высококачественных и воспроизводимых покрытий методом СГН необходима информация об особенностях процесса напыления, в том числе зависимости свойств покрытия от параметров частицы перед столкновением с преградой. При решении данной задачи мощным инструментом исследования является математическое моделирование процесса формирования покрытия с использованием численных методов механики сплошной среды.

В настоящей работе аппарат численных методов применен к исследованию высокоскоростного соударения одиночной частицы, движу-

щейся в характерном для сверхзвукового напыления диапазоне скоростей 500...1000 м/с, с преградой (обрабатываемой деталью). Целью исследования являлось расчетное определение изменения формы частицы в процессе удара о преграду от параметров напыления — скорости и температуры частицы. В качестве материала частицы выбраны хромоникелевый сплав NiCr и алюминий, а в качестве материала преграды — сталь 20.

Расчеты проводились в двумерной осесимметричной постановке с использованием эйлера конечно-разностного алгоритма и выделением контактных разрывов методом концентраций [1, 2]. При описании процесса взаимодействия применена модель идеальной упругопластической среды.

Постановка задачи. Предполагается, что тело сферической формы (частица) с температурой T_0 движется навстречу преграде (подложке) с начальной скоростью V_0 . В момент времени $t = 0$ происходит соударение частицы с подложкой и начинается процесс внедрения. Частица движется по нормали к поверхности преграды, обращенной к частице (ось z).

В этом случае система исходных соотношений, описывающих рассматриваемый процесс в двумерной осесимметричной постановке в цилиндрической системе координат (r, θ, z) , имеет классический вид [1–3]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v_r)}{\partial r} + \frac{\partial (\rho v_z)}{\partial z} + \frac{\rho v_r}{r} = 0;$$

$$\rho \frac{dv_r}{dt} = \frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{\partial D_{rz}}{\partial z} + \frac{2D_{rr} + D_{zz}}{r};$$

$$\rho \frac{dv_z}{dt} = \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial D_{rz}}{\partial r} + \frac{D_{rz}}{r};$$

$$\rho \frac{de}{dt} = \sigma_{rr} \dot{\epsilon}_{rr} + \sigma_{zz} \dot{\epsilon}_{zz} + \sigma_{\theta\theta} \dot{\epsilon}_{\theta\theta} + 2\sigma_{rz} \dot{\epsilon}_{rz};$$

$$p = p(\rho, e);$$

$$\sigma_{ij} = -pg_{ij} + D_{ij};$$

$$\dot{\epsilon}_{rr} = \frac{\partial v_r}{\partial r}; \quad \dot{\epsilon}_{\theta\theta} = \frac{v_r}{r}; \quad \dot{\epsilon}_{zz} = \frac{\partial v_z}{\partial z}; \quad \dot{\epsilon}_{rz} = \frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r}; \quad \dot{\epsilon}_{r\theta} = \dot{\epsilon}_{z\theta} = 0;$$

$$\frac{DD_{rr}}{Dt} = 2G \left(\dot{\epsilon}_{rr} + \frac{1}{3\rho} \frac{d\rho}{dt} \right);$$

$$\frac{DD_{zz}}{Dt} = 2G \left(\dot{\epsilon}_{zz} + \frac{1}{3\rho} \frac{d\rho}{dt} \right); \quad \frac{DD_{rz}}{Dt} = G \dot{\epsilon}_{rz};$$

$$f = 2(D_{rr}^2 + D_{rz}^2 + D_{zz}^2 + D_{rr}D_{zz}) \leq \frac{2}{3}Y^2.$$

Здесь ρ — плотность; p — давление; e — удельная внутренняя энергия; t — текущее время; r, z — радиальная и осевая координаты; ν_r, ν_z — компоненты вектора скорости; g_{ij} — метрические коэффициенты основного базиса выбранной системы координат, причем $i, j = r, \theta, z$; $\sigma_{rr}, \sigma_{zz}, \sigma_{\theta\theta}$ — нормальные напряжения в радиальном, осевом и тангенциальном направлениях; σ_{rz} — касательные напряжения; D_{ij} — компоненты девиатора напряжений; $\dot{\epsilon}_{ij}$ — компоненты тензора скоростей деформаций; $D(\dots)/Dt$ — производная Яуманна; G — модуль сдвига; Y — динамический предел текучести среды. В приведенной системе уравнений в порядке следования приведены законы сохранения массы, импульса и энергии, в общем виде уравнения состояния взаимодействующих сред (частицы и преграды), взаимосвязь компонент тензора полных напряжений с шаровой и девиаторной составляющими, кинематические соотношения, физические соотношения в виде закона Гука в дифференциальной форме и условия пластического течения Мизеса.

В качестве уравнения состояния для всех рассматриваемых материалов использовалась линейная баротропная зависимость вида $p = K(\rho/\rho_0 - 1)$, где $K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}$ — модуль объемного сжатия, E — модуль Юнга, ν — коэффициент Пуассона. Модуль сдвига среды в первом приближении можно рассчитать по формуле $G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$.

С увеличением температуры предел текучести уменьшается приблизительно по линейному закону $Y = \sigma_T(1 - T_*)$, $T_* = \frac{T - T_1}{T_m - T_1}$ [2, 3], где T_* — гомологическая температура; T — текущая температура; $T_1 = 293$ К — нормальная температура; T_m — температура плавления. Физико-механические свойства используемых материалов частицы и подложки систематизированы в табл. 1 [4].

Таблица 1

Свойства материалов

Параметр	Значение		
	NiCr	Al	Сталь 20
Плотность ρ , кг/м ³	8400	2710	7850
Динамический предел текучести σ_n , МПа	420	25	500
Модуль Юнга E , ГПа	218	70	210
Теплоемкость C_p , Дж/(кг·К) (при 298 К)	440	902	452
Температура плавления T_m , К	1400	933	1805

В процессе исследования были выполнены расчеты при начальных условиях, приведенных в табл. 2.

Расчеты были проведены для скоростей $V_0 = 500$ м/с и 1000 м/с в диапазоне температур $T_0 = 700 \dots 1400$ К для частиц NiCr и

Начальные условия расчетов

№	NiCr			Al		
	T_0 , К	Y , МПа	$C_p T$, ГДж/кг	T_0 , К	Y , МПа	$C_p T$, ГДж/кг
1	700	265,6	0,308	434	19,5	0,391
2	1120	106,2	0,493	747	7,3	0,674
3	1400	0	0,616	933	0	0,841

$T_0 = 434 \dots 933$ К для частиц алюминия. Температура подложки при этом составляла 300 К. Указанные значения скоростей и температур были получены в рамках расчетно-теоретического моделирования процессов ускорения и нагрева частиц в газовом потоке [5] и соответствуют диапазону, характерному для технологического процесса высокоскоростного газопламенного напыления.

Анализ результатов математического моделирования. Получена картина изменения формы частицы, глубины ее внедрения в преграду и высоты частицы над поверхностью преграды (рис. 1). В процессе деформирования частица принимает дискообразную форму со сложным поперечным сечением. Внешний диаметр этого диска D будем называть диаметром деформированной частицы, а максимальную толщину диска h – высотой деформированной частицы. Глубину образующейся каверны, или глубину внедрения частицы, обозначим l .

Как показали результаты исследований, диаметр деформированной частицы возрастает с ростом температуры, что объясняется уменьшением предела текучести материала. Кроме того, при высоких скоростях ($V_0 = 1000$ м/с) наблюдается менее интенсивный рост диаметра деформированной частицы. Это можно объяснить тем, что при возрастании скорости частица глубже внедряется в преграду и растекания ее по поверхности не происходит. Отметим, что изменения глубины внедрения от начальной температуры частицы не наблюдается.

Изменение высоты деформированной частицы над поверхностью преграды в зависимости от температуры имеет различный характер. При скорости 500 м/с увеличение начальной температуры приводит к растеканию частицы по поверхности преграды. При более высокой скорости частицы происходит “выплескивание” материала частицы из образованного в подложке кратера. Разрушение частицы алюминия наблюдается при ее температуре плавления и скорости 1000 м/с.

На рис. 2 приведено распределение температуры в частице NiCr и подложке на оси z в различные моменты времени при скорости $V_0 = 500$ м/с и температуре 700 К. Значение $z = 0$ мм соответствует первоначальной границе раздела частицы и преграды. Локальное повышение температуры в зоне контакта связано с переходом кинетической энергии частицы в энергию упругой, а затем пластической деформации. При этом частица нагревается на 100 °С.

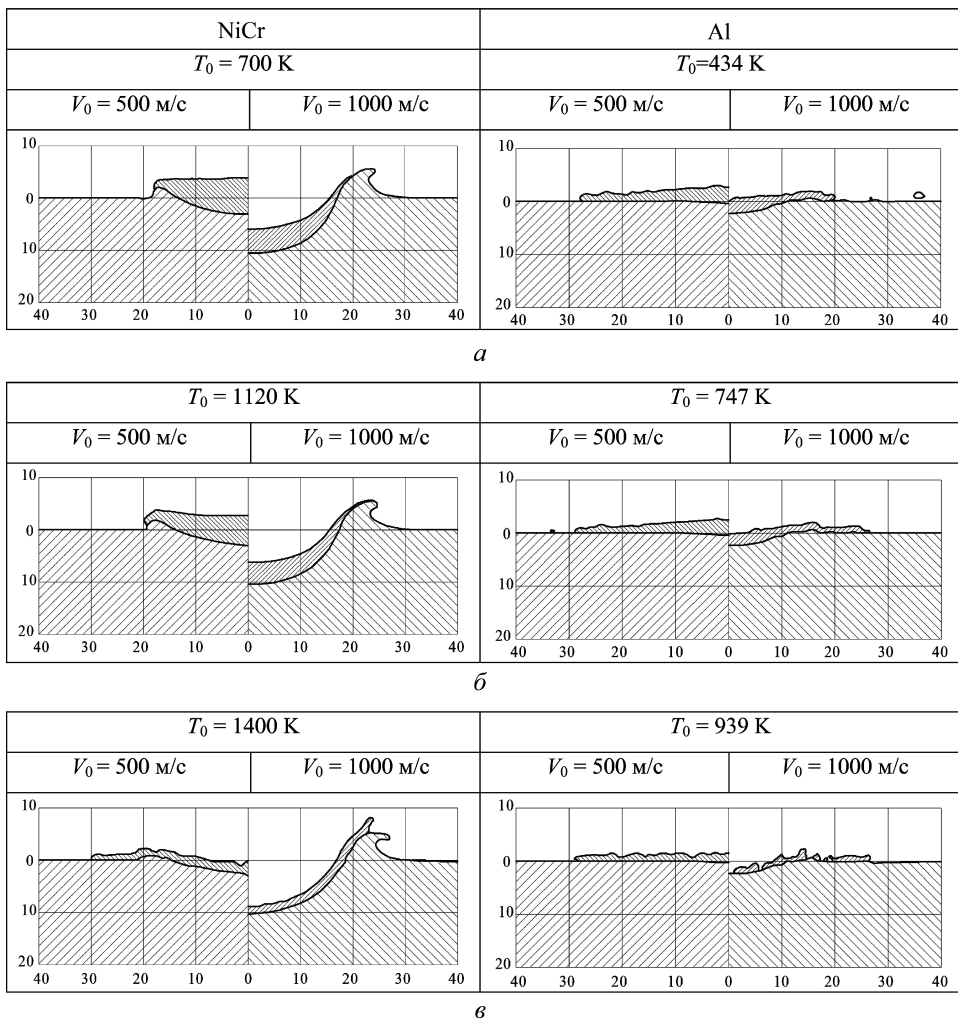


Рис. 1. Изменение частиц нихрома (слева) и алюминия (справа) после деформирования при различных значениях начальных скоростей и температур:

a – при $0,5 T_m$; *б* – при $0,8 T_m$; *в* – при T_m

На рис. 3 приведены зависимости характерных размеров (диаметра, высоты над поверхностью преграды и глубины внедрения в преграду) деформированной частицы нихрома от времени для трех различных вариантов расчета. Поскольку скорость частицы совпадает с направлением изменения высоты и глубины внедрения частицы, то именно скорость оказывает наибольшее влияние на интенсивность изменения этих параметров. При скорости $V_0 = 1000 \text{ м/с}$ наблюдается более высокий темп уменьшения высоты частицы над преградой (рис. 3, *a*) и увеличения глубины ее внедрения (рис. 3, *б*). Следует отметить, что зависимость $h = f(t)$ при этой скорости имеет локальный минимум (см. рис. 3, *a*). Это связано с тем, что в определенный момент времени деформация частицы в радиальном направлении превышает ее

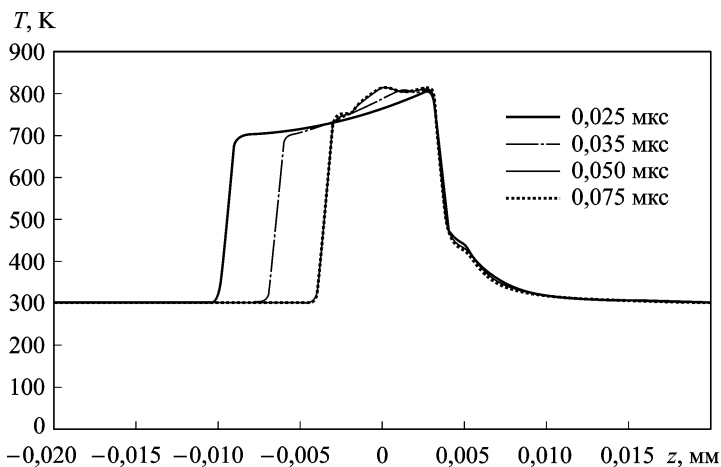


Рис. 2. Распределение температуры на оси z в различные моменты времени

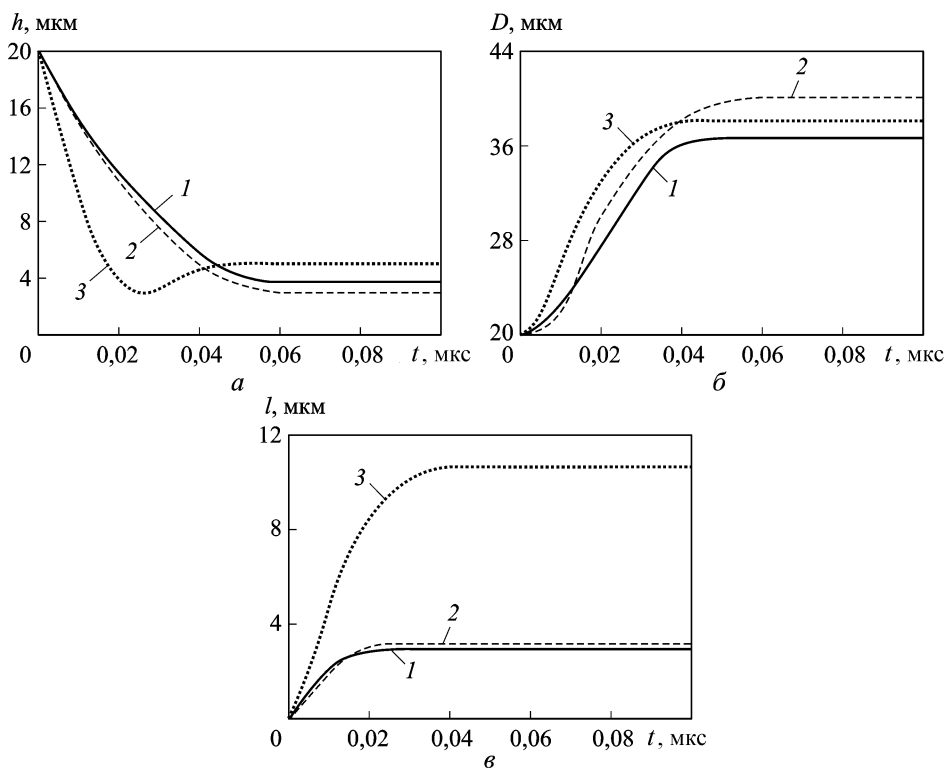


Рис. 3. Зависимости высоты над преградой (а), диаметра (б) и глубины внедрения в преграду (в) деформированной частицы нихрома от времени:
 $1 - V_0 = 500 \text{ м/с}, T_0 = 700 \text{ К}; 2 - V_0 = 500 \text{ м/с}, T_0 = 1120 \text{ К}; 3 - V_0 = 1000 \text{ м/с}, T_0 = 700 \text{ К}$

деформацию в осевом направлении: частица растекается по поверхности преграды. Последующее увеличение высоты вызвано тем, что периферийные участки частицы отрываются от поверхности деформированной подложки (рис. 1, в).

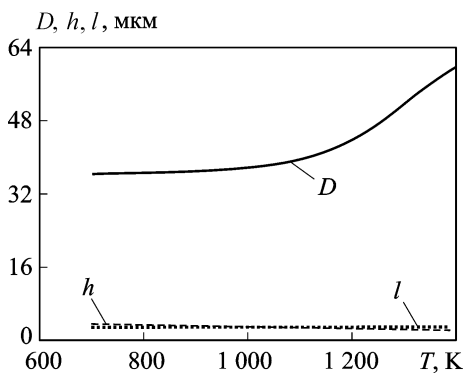


Рис. 4. Зависимость размеров (D, h, l) деформированной частицы нихрома от температуры нагрева

На рис. 4 приведены результаты влияния начальной температуры частицы нихрома на ее размеры после соударения с преградой при $V_0 = 500$ м/с. Зависимость диаметра деформированной частицы от температуры имеет возрастающий характер. Это связано с большей пластичностью материала частицы при приближении к температуре плавления, что приводит к растеканию частицы по поверхности подложки. При этом не обнаружено заметного влияния температуры частицы на глубину ее внедрения в преграду и ее высоту над поверхностью преграды.

Заключение. Таким образом, на основе полученных результатов выявлено влияние каждого из параметров частицы (скорости и температуры) на ее форму в процессе деформации. Как показали результаты расчетов, при температуре частицы, близкой к температуре плавления T_m ее материала, не обеспечиваются требуемые характеристики покрытия, особенно при больших скоростях, что позволяет оценить верхнюю границу параметров частицы перед столкновением с преградой. Поскольку деформированная частица является единичным фрагментом при образовании слоя покрытия, то данные результаты можно использовать в дальнейших исследованиях по определению адгезионных характеристик покрытий, получаемых методом высокоскоростного газопламенного напыления.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 09-08-00947.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабкин А. В., Колпаков В. И., Охитин В. Н., Селиванов В. В. Численные методы в задачах физики быстротекущих процессов: Учеб. для вузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006.
2. Селиванов В. В., Колпаков В. И., Клименко А. В. Высокоскоростное взаимодействие фторопластсодержащих ударников с преградами из титанового и алюминиевого сплавов // Химическая физика. – 2008. – Т. 27, № 2. – С. 66–74.

3. Физика взрыва / Под ред. Орленко Л.П. Т. 1, 2. – М.: Физматлит, 2004.
4. Физические величины: Справочник / Под ред. Григорьева И.С., Мейлихова Е.З. – М.: Энергоиздат, 1991.
5. Воронцовский А. В., Сучков С. А., Филимонов Л. А. Математическое моделирование многофазных потоков в каналах со специально формируемыми системами скачков уплотнения применительно к установкам HVOF // Тез. докл. XXIII науч. конф. стран СНГ “Дисперсные системы”. – Одесса, Украина, 2008.

Статья поступила в редакцию 20.09.2010

Андрей Владимирович Воронцовский родился в 1946 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1970 г. Д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ. Заведующий отделом НИИ ЭМ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 100 научных работ в области тепло- и массообмена в двухфазных потоках.

A.V. Voronetskii (b. 1946) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1970. D. Sc. (Eng.), professor, Honored Science Worker of the Russian Federation. Head of department of Power Engineering research institute of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 100 publications in the field of heat and mass exchange in two-phase flows.

Владимир Иванович Колпаков родился в 1954 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1978 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Технологии ракетно-космического машиностроения”. Специалист в области математического моделирования динамических процессов.

V.I. Kolpakov (b. 1954) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1978. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Technologies of Rocket and Space Engineering” department of the Bauman Moscow State Technical University. Specializes in the field of mathematical simulation of dynamical processes.

Лев Александрович Филимонов родился в 1962 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1987 г. Научный сотрудник НИИ ЭМ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 20 научных работ в области математического моделирования процессов тепло- и массообмена в двухфазных потоках.

L.A. Filimonov (b. 1962) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1987. Researcher of Power Engineering research institute of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 20 publications in the field of mathematical simulation of processes of heat and mass exchange in two-phase flows.

Александр Алексеевич Ходыкин родился в 1986 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2009 г. Аспирант кафедры “Ракетные двигатели” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специалист в области систем газотермического напыления и исследования физических процессов при нанесении покрытий.

A.A. Khodykin (b. 1986) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2009. Post-graduate of “Rocket Engines” department of the Bauman Moscow State Technical University. Specializes in the field of systems of gas thermal spraying and study of physical processes in application of coatings.

