

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ
в рамках научных проектов № 18-08-01152 и № 18-08-01475.*

А. С. Тамбовцев, В. В. Беляев, И. П. Гуляев

CFD-АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЧАСТИЦ С ПОВЕРХНОСТЬЮ В УСЛОВИЯХ СУСПЕНЗИОННОГО ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ

Газотермическое нанесение покрытий с использованием суспензий и растворов прекурсоров позволяет получать перспективные функциональные покрытия на основе оксидных керамик с контролируемой микроструктурой. В работе проведено CFD-моделирование течений воздушной плазмы, формируемых плазматроном «ПНК-50» в дозвуковых и сверхзвуковых режимах работы (диаметр выходного сопла 6, 8, 10 мм, расход газа плазмообразующего газа 1-7 г/с, скорость потока 500-2100 м/с). Изучено взаимодействие одиночных частиц напыляемого материала размером 0.1-5 мкм с пограничным слоем газа на поверхности подложки (основы) в процессе формирования покрытия, получены значения скорости соударения частиц с основой в различных режимах напыления. Показано, что минимальный размер частиц, участвующих в формировании покрытия, составляет 0.5-1 мкм.

Ключевые слова: плазменное напыление; покрытия; суспензия; размер частиц; микроструктура.

A. S. Tambovtsev, V. V. Belyaev, I. P. Gulyaev

CFD-ANALYSIS OF THE INTERACTION OF PARTICLES WITH A SURFACE IN THE CONDITIONS OF SUSPENSION PLASMA SPRAYING

Gas-thermal coating using suspensions and solutions of precursors allows to obtain promising functional coatings based on oxide ceramics with a controlled microstructure. CFD modeling of air plasma flows generated by the PNK-50 plasmatron in subsonic and supersonic operating modes (diameter of the nozzle 6, 8, 10 mm, gas flow rate of a plasma-forming gas 1 - 7 g / s, flow rate 500 - 2100 m / s). The interaction of single particles of the sprayed material with a size of 0.1 - 5 μm with the boundary layer of gas on the surface of the substrate (base) in the process of coating formation was studied, the values of the speed of collision of particles with the base in various spraying modes were obtained. It is shown that the minimum particle size involved in coating formation is 0.5 - 1 μm .

Keywords: plasma spraying; coatings; suspension; particle size; microstructure.

Введение

Суспензионное напыление занимает промежуточное положение между газотермическим напылением (ГТН) порошковых материалов и методами, основанными на осаждении покрытий из газовой фазы (электронно-лучевое, магнетронное, химическое и т. д.). Рассматриваемый метод нанесения покрытий основан на применении исходных материалов в виде жидкой фазы – суспензии частиц размером 10-1000 нм или растворов химических реагентов-прекурсоров (например, соли металлов). Материал инжектируется в высокотемпературный и высокоскоростной газовый поток, где происходит дробление жидкости на капли размером 10-20 мкм, испарение и снижение размера капель, формирование «сухих» частиц материала размером порядка 1 мкм. Использование в ГТН порошковых материалов субмикронного размера невозможно по двум причинам: во-первых, порошок агломерируется (комкуется) и

становится практически несыпучим, во-вторых, ввести такие мелкие частицы в высокоскоростную струю не позволяет их малая инерция.

Снижение размера напыляемых частиц с 25-100 мкм, характерного для традиционных порошковых методов ГТН, до 1 мкм позволяет радикально изменить микроструктуру и функциональные характеристики формируемых покрытий. В связи с тем, что процесс жидкофазного напыления осуществляется в воздушной атмосфере, данная технология применяется только для оксидных материалов. Важно подчеркнуть, что производительность напыления (скорость роста покрытий) с использованием жидких материалов в 2–5 раз ниже, чем в традиционном порошковом напылении, однако на 1–2 порядка выше, чем в методах осаждения материалов из газовой фазы.

Резкий рост интереса к данной технологии возник в начале 2000-х годов. Основными причинами интенсивных исследований стали очевидные перспективы метода в двух важных задачах: теплозащитные покрытия лопаток авиационных двигателей [1] и ТОТЭ(SOFC)-элементы [2]. Обзоры, посвященные плазменному напылению суспензий и растворов (Suspension Plasma Spraying, Solution Precursor Plasma Spraying) [3; 4], обобщают опыт экспериментальных работ и позволяют определить практические ориентиры для реализации процесса: вязкость жидкости 10-50 мПа·с, объемный расход жидкости 20-120 мл/мин, дистанция напыления 40-100 мм, скорость роста покрытия 2-15 мкм за проход. Для получения качественных покрытий требуется применение плазмотронов мощностью 70-100 кВт и выше, таких как Axial III (Northwest Mettech), Triplex (Oerlikon Metco), 100HE (Progressive Technologies). Это связано, во-первых, со значительными тепловыми затратами на испарение жидкости (около 50% полезной мощности) [5], а во-вторых, с необходимостью повышения скорости субмикронных частиц до 500-1000 м/с, чтобы они могли преодолеть пограничный слой газа у поверхности подложки [6; 7]. Рельеф поверхности получаемого покрытия, размер периодических структур сильно зависят от шероховатости и способа механической обработки подложки [8]. В работе [9] приведены общие рекомендации по выбору режимных параметров процесса напыления (мощность плазмотрона, расход плазмообразующего газа, скорость подачи жидкости и перемещения образца и т. д.) для получения необходимой структуры покрытия (плотная/пористая/столбчатая), однако степень их применимости к напылительным системам различных конструкций остаётся неясна.

За последние 10-15 лет накоплен сравнительно большой объем экспериментальных данных, касающихся технологической стороны вопроса. В то же время физика явлений, происходящих в цепочке «формирование капель – формирование частиц материала – ускорение и нагрев частиц – соударение с основой» остается слабо исследованной. Причиной этому являются традиционные сложности изучения межфазного тепломассообмена в системе «дисперсные частицы – высокотемпературный поток», характерные для условий ГТН: малый размер и высокая скорость объектов. В условиях жидкофазного напыления указанные проблемы усугубляются в еще большей степени: скорости частиц еще выше, их размеры еще меньше, необходимо учитывать эффекты Кнудсена и Стокса. Короткие дистанции напыления (обычно 50-80 мм) приводят к тому, что практически все рассматриваемые процессы происходят в ядре плазменной струи, интенсивное излучение которой чрезвычайно затрудняет их оптическую диагностику. Кроме того, добавляются процессы поверхностного испарения несущей жидкости, формирования твердого осадка, пиролиза. Динамика этих явлений в настоящий момент остается практически неизученной.

Цель работы – численный анализ взаимодействия одиночных частиц напыляемого материала с пограничным слоем газа на поверхности основы современными методами вычислительной гидродинамики (CFD – от англ. computational fluid dynamics).

Методика численного эксперимента

Численное моделирование процессов суспензионного газотермического напыления в основном производится с использованием коммерческих CFD-пакетов, чаще всего Ansys Fluent

[7; 10]. Использование встроенных моделей двухфазных течений позволяет достаточно точно предсказывать скорость и траектории напыляемых частиц, однако динамика межфазного теплообмена рассматривается в рамках однородного (безградиентного) нагрева частиц, который зачастую неуместен даже при анализе порошкового напыления.

Анализируя современное состояние исследований в области нанесения ТЗП и ТОТЭ, невозможно обойти вопрос применяемых материалов. Традиционно для этих целей используется диоксид циркония ZrO_2 , стабилизированный в тетрагональной фазе с помощью 5-8 % добавки оксида иттрия Y_2O_3 . Главные его преимущества: высокая температура плавления – 3000 К, низкая теплопроводность ~ 2.6 Вт/(м·К) и высокий КТР на уровне $11 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹, сравнимый с металлической основой лопатки. Однако рабочая температура таких покрытий ограничена пределом 1200-1250 °С, при котором начинается заметная деградация тетрагональной структуры материала. Эти значения не удовлетворяют требованиям авиадвигателей нового поколения, в которых требуется повышение рабочей температуры до 1350-1450 °С. Главные кандидаты на материал для оксидного слоя ТЗП будущего: перовскиты $SrZrO_3$, $Ba(Mg_{1/3}Ta_{2/3})O_3$; гексаалюминиды лантана $LaLiAl_{11}O_{18.5}$, $LaTi_2Al_9O_{19}$; а также цирконаты лантаноидов $Ln_2Zr_2O_7$ ($Ln=La, Nd, Sm, Gd$) с кристаллической структурой пироксенов [1; 11]. При этом, по современным данным, именно последняя группа материалов выглядит наиболее перспективной. Примечательно, что примерно те же классы материалов являются кандидатами на роль электролитов будущего в ТОТЭ [12]. При этом именно методы плазменного напыления суспензий и растворов прекурсоров демонстрируют возможности получения покрытий требуемой толщины, микроструктуры и пористости в рассматриваемых задачах [13; 14].

Постановка задачи CFD-анализа

Теоретический анализ посвящен определению условий напыления, при которых частицы микронного и субмикронного размера способны достигнуть поверхности подложки (основы для нанесения покрытия) и сформировать покрытие.

Численное моделирование взаимодействия одиночных частиц напыляемого материала с плазменным потоком выполнялось на основе решения полных уравнений Навье – Стокса в пакете Ansys Fluent 17.2. Рассматривалась стационарная осесимметричная задача с абсолютной формулировкой скорости, с учётом переноса энергии. В расчётах использована геометрия канала плазмотрона «ПНК-50» с соплами диаметром 6, 8, 10 мм, соответствующими условиям нанесения покрытий в экспериментах. На расстоянии 80 мм от среза сопла плазмотрона была установлена подложка диаметром 25 мм. Расчетная сетка (рис. 1) состояла примерно из 35 тысяч узлов.

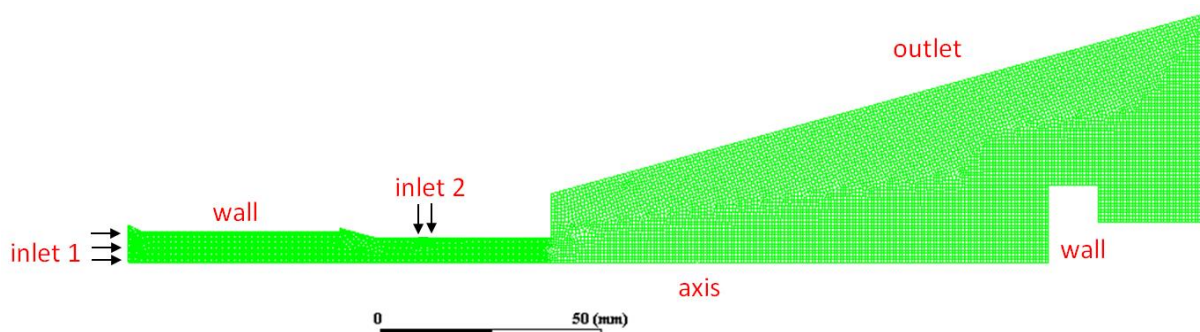


Рисунок 1 – Сетка в расчетной области плазменного потока.

Слева – канал плазмотрона, справа – подложка

Вычисления проводились с использованием моделей газа и параметров решателя, выбранных по результатам верификации расчетов, проведенных в работе [15].

Таблица 1 – Параметры численных моделей

Решатель	Вязкость	Параметры	Уравнение состояния газа
Density based	Realizable k-epsilon	$C_{\varepsilon 2} = 1.9$, TKE Pr = 1, TDR Pr = 1.2, Energy Pr = 0.85, Wall Pr = 0.85	Плотность – Soave-Redlich-Kwong. Теплоемкость, теплопроводность, вязкость – кусочно-полиномиальная зависимость по табличным данным [16]

Параметры турбулентности задавались через интенсивность турбулентности, равную 5 %, и коэффициент турбулентной вязкости, равный 10. Использовался решатель *Density based* с неявной схемой и моделированием течения по типу *Roe-FDS* (Roe flux-difference splitting). Пространственная дискретизация градиентов осуществлялась с помощью метода наименьших квадратов. Давление, плотность, импульс и энергия вычислялись со вторым порядком точности, турбулентная кинетическая энергия – с первым.

Граничные условия варьировались путем задания массового расхода и температуры плазмообразующего газа на границе *inlet1*, а также расхода транспортирующего и фокусирующего газов на границе *inlet2* (температура 300 K), соответствующих различным режимам работы плазмотрона при токе дуги 200 A (таблица 2).

Таблица 2 – Граничные условия исследованных режимов работы плазмотрона

Расход плазмообразующего и защитного газа, г/с (inlet 1)	Расход транспортирующего и фокусирующего газа, г/с (inlet 2)	Ток дуги, A	Температура плазмообразующего газа, K (inlet 1)
Сопло 6 мм			
1.0 + 0.15	0.3 + 0.3	200 A	6800
3.0 + 0.45	0.9 + 0.9	200 A	5000
5.0 + 0.75	1.5 + 1.5	200 A	4200
7.0 + 1.0	2.1 + 2.1	200 A	3800
Сопло 8 мм			
1.0 + 0.15	0.3 + 0.3	200 A	6800
3.0 + 0.45	0.9 + 0.9	200 A	5000
5.0 + 0.75	1.5 + 1.5	200 A	4200
7.0 + 1.0	2.1 + 2.1	200 A	3800
Сопло 10 мм			
1.0 + 0.15	0.3 + 0.3	200 A	6800
3.0 + 0.45	0.9 + 0.9	200 A	5000
5.0 + 0.75	1.5 + 1.5	200 A	4200
7.0 + 1.0	2.1 + 2.1	200 A	3800

На стенке канала плазмотрона *wall* задавалось условие неприлипания газа и отсутствия теплового потока. На поверхности *outlet* задавалось значение атмосферного давления 100 кПа и температуры окружающего воздуха 300 K. Температура плазмообразующего газа задавалась на основе измерения мощностных характеристик плазмотрона в реальных условиях работы (мощность электрической дуги, мощность тепловых потерь в канале).

В качестве дисперсной фазы рассматривались частицы диоксида циркония ZrO_2 размером 0.1, 0.3, 0.5, 1, 3, 5 мкм. При анализе межфазного переноса тепла и импульса «плазменный поток – частица», для того чтобы учесть эффект переменных свойств среды (резкое изменение теплофизических свойств газа в температурном пограничном слое у поверхности частицы), использовался аппарат UDF (User Defined Functions) пакета Fluent. Эффект разреженности газа и испарения материала в расчетах не учитывался.

Ранее в экспериментах было установлено, что процесс дробления капель суспензии ZrO_2 , сушки и полного плавления материала происходит на дистанции 6-12 мм вниз по потоку от точки инъекции материала. Поэтому для упрощения расчетов ввод частиц в струю осу-

ществлялся на срезе сопла плазмотрона (20 мм от узла инжектора в канале). Для изучения траекторного эффекта частиц инжекция осуществлялась в трех точках с радиальными координатами $r_{inj} = 0.1, 1, 2$ мм.

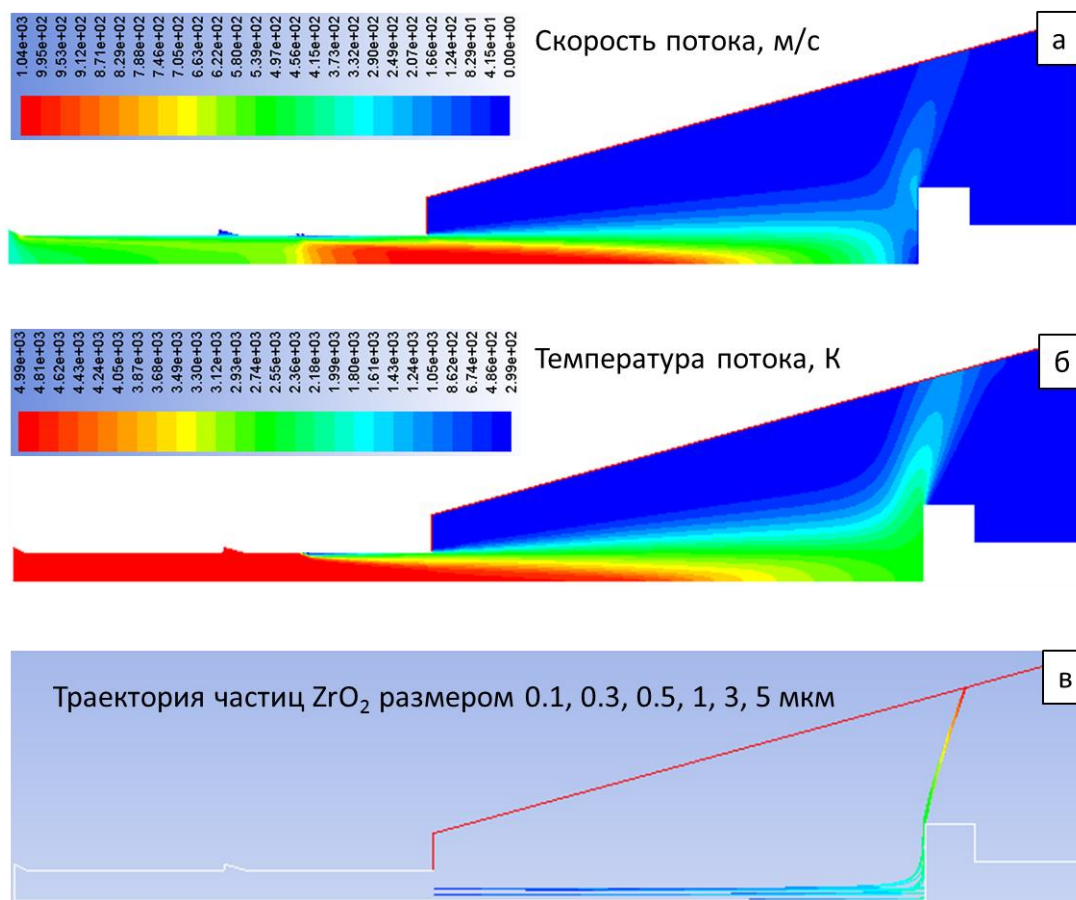


Рисунок 2 – Результаты расчета полей скорости (а) и температуры (б), а также траекторий частиц ZrO_2 (в) при использовании сопла диаметром 10 мм и расхода плазмобразующего газа 3 г/с

На рис. 2 в качестве примера представлены результаты расчета течения плазменной струи при использовании сопла диаметром 10 мм и расхода плазмобразующего газа 3 г/с. На фрагменте рис. 2 (в) видно, что в указанном режиме частицы размером 0.1-1 мкм не соударяются с подложкой, а уносятся газовым потоком на периферию. Частицы размером 3 и 5 мкм достигают подложки.

Обсуждение результатов эксперимента

На рис. 3 показаны графики изменения скорости (а) и температуры (б) плазменного потока на оси струи в указанном режиме работы плазмотрона. На фрагменте рис. 3 (а) пунктирной линией обозначена внешняя граница динамического пограничного слоя, положение которой определялось по точке перегиба графика скорости (изменение знака второй производной d^2V_x/dx^2).

На рис. 3 (в, г) показаны изменения осевой скорости V_x частиц ZrO_2 размером 0.1-0.5 мкм и 1-5 мкм. Для каждого размера частиц показаны три графика, соответствующие начальной координате инжекции $r_{inj} = 0.1, 1, 2$ мм. В данном случае частицы размером 5 мкм перед входом в пограничный слой имеют скорость 700-750 м/с, а при соударении с подложкой – 590-560 м/с, а частицы размером 3 мкм перед входом в пограничный слой имеют скорость 550-600 м/с, а при соударении с подложкой – 400-460 м/с. Скорость частиц размером 1 мкм при приближении к подложке составляет 340-360 м/с, однако такого значения оказыва-

ется недостаточно для преодоления торможения в пограничном слое, вследствие чего частицы не достигают подложки, а отклоняются газовым потоком в радиальном направлении.

Для мелких частиц (менее 1 мкм) скорость и траектория движения практически перестают зависеть от их размера (рис. 3в), так как частицы отслеживают линии тока газа. Движение таких частиц полностью определяется условиями их инъекции в поток.

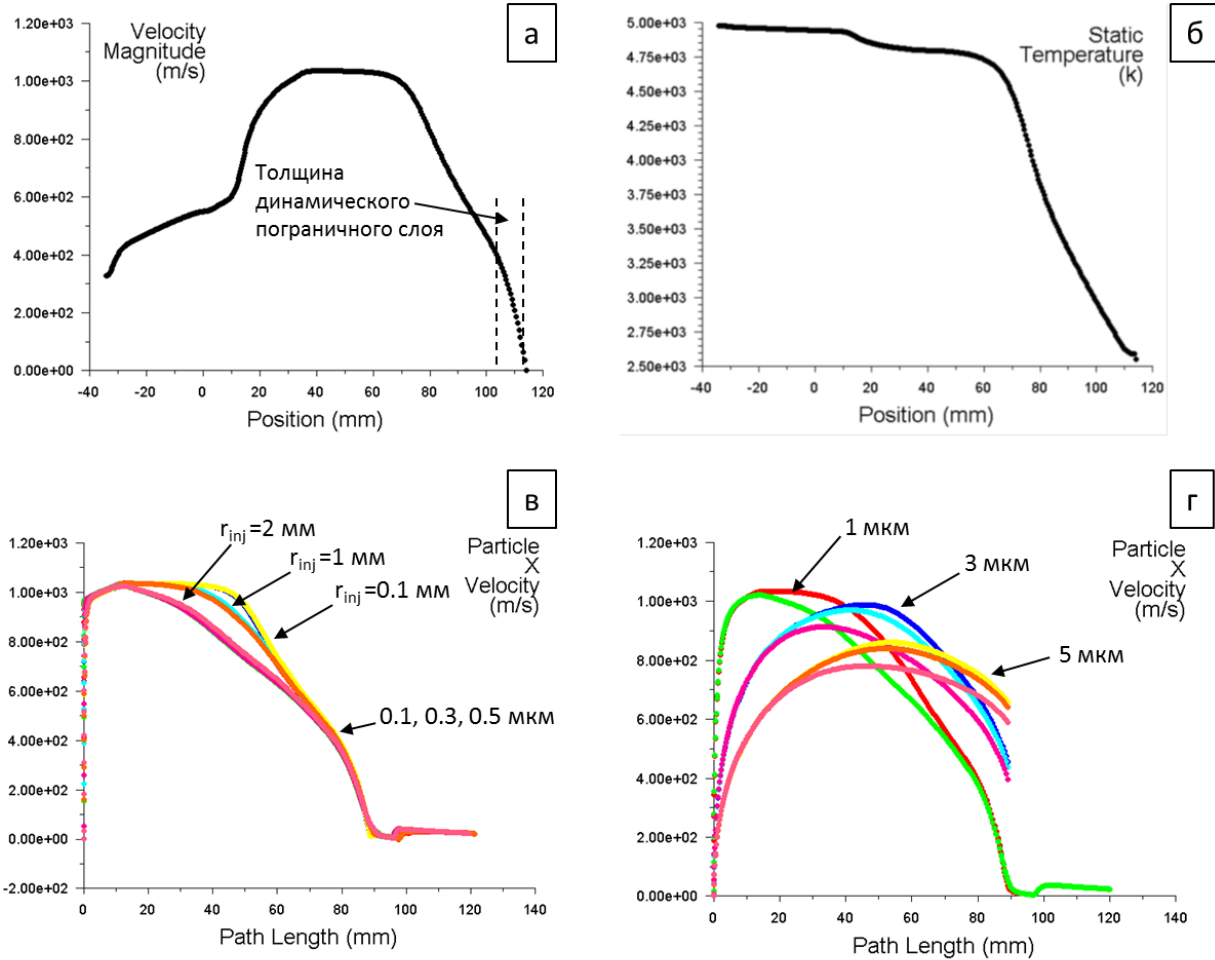


Рисунок 3 – Изменение скорости (а) и температуры (б) плазменного потока на оси струи, а также изменение скорости частиц ZrO_2 размером 0.1-0.3 мкм (в) и размером 1-3 мкм (г) при использовании сопла диаметром 10 мм и расхода плазмообразующего газа 3 г/с

Аналогичные численные исследования были проведены для всех режимов работы плазмотрона. В таблице 3 представлены результаты измерения среднемассовых значений скорости и температуры плазмы на выходе из сопла плазмотрона, толщины динамического пограничного слоя у поверхности подложки, скорости частиц перед пограничным слоем и скорости соударения частиц с подложкой. В случаях, когда частицы не достигали поверхности подложки, скорость соударения не указывалась.

Для обобщения результатов численного анализа условий соударения частиц с подложкой производили оценку числа Стокса по формуле

$$St = \frac{\rho_p d_p^2 V_0}{18 \mu_g h},$$

в которой ρ_p, d_p, V_0 – плотность, диаметр и скорость частицы при входе в пограничный слой, μ_g – вязкость газа, h – толщина пограничного слоя. Вязкость газа μ_g брали по таб-

личным данным для средней температуры в пограничном слое (рис. 3 (б)). Число Стокса характеризует инерционность частиц в окрестности критической точки натекающего потока: при $St \leq 1$ частицы отслеживают линии тока газа и обтекают подложку, а при $St > 1$ соударяются с ней (рис. 4).

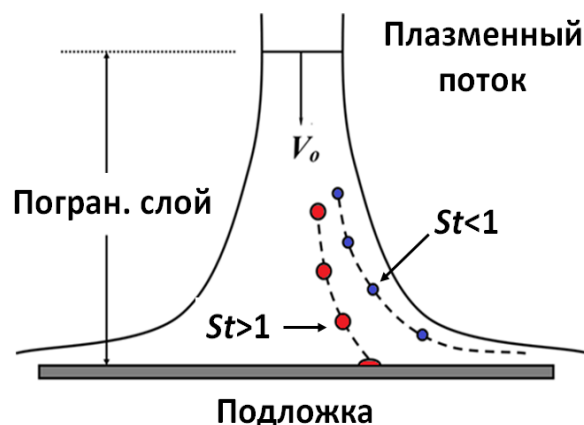


Рисунок 4 – Схематическое изображение влияния числа Стокса на движение частиц при натекании струи на подложку

В таблице 3 представлены результаты расчета параметров газового потока на выходе из сопла плазмотрона (среднемассовые значения температуры и скорости), а также параметров пограничного слоя при натекании на подложку, установленную на расстоянии 80 мм от сопла плазмотрона (толщина пограничного слоя, средняя температура и вязкость газа). Температура газа при натекании на преграду во всех случаях примерно вдвое ниже, чем при выходе из сопла плазмотрона. Увеличение скорости потока (расхода плазмообразующего газа) приводит к снижению толщины пограничного слоя.

Таблица 3 – Параметры динамического пограничного слоя у поверхности подложки

Расход плазмообразующего и защитного газа, г/с	Среднемасс. температура плазмообразующего газа, К	Среднемасс. скорость плазмообразующего газа, м/с	Толщина погран. слоя у подложки, мм	Температура газа в погран. слое, К	Вязкость газа в погран. слое, Па·с
Сопло 6 мм					
1.0 + 0.15	6.8E+03	1.3E+03	13	2.7E+03	8.70E-05
3.0 + 0.45	5.0E+03	1.7E+03	11	2.3E+03	7.60E-05
5.0 + 0.75	4.2E+03	1.9E+03	8	2.1E+03	7.10E-05
7.0 + 1.0	3.8E+03	2.1E+03	8	2.0E+03	6.90E-05
Сопло 8 мм					
1.0 + 0.15	6.8E+03	8.5E+02	14	3.3E+03	1.05E-04
3.0 + 0.45	5.0E+03	1.2E+03	12	2.3E+03	7.60E-05
5.0 + 0.75	4.2E+03	1.6E+03	9	2.2E+03	7.40E-05
7.0 + 1.0	3.8E+03	1.9E+03	8	2.1E+03	7.10E-05
Сопло 10 мм					
1.0 + 0.15	6.8E+03	5.5E+02	15	3.3E+03	1.05E-04
3.0 + 0.45	5.0E+03	8.5E+02	13	2.7E+03	8.70E-05
5.0 + 0.75	4.2E+03	1.1E+03	11	2.6E+03	8.40E-05
7.0 + 1.0	3.8E+03	1.4E+03	9	2.6E+03	8.40E-05

Результаты измерения скорости частиц ZrO_2 размером 0.1, 0.3, 0.5, 1, 3, 5 мкм во всех изученных режимах работы плазмотрона в графическом виде представлены на рис. 5. Значения для каждого типа сопла обозначены индивидуальными маркерами, скорость частиц каждого размера растет с увеличением расхода плазмообразующего газа. На рис. 5(а) видно, что

для всех типов сопел значения скорости частиц размером 0.1-1 мкм перед входом в пограничный слой составляют 200-1000 м/с (в зависимости от расхода плазмообразующего газа 1...7 г/с). Скорость этих частиц практически не зависит от размера и определяется исключительно характеристиками газового потока. Это связано с тем, что частицы имеют малую массу и полностью следуют линиям тока газа. Скорость частиц размером 3, 5 мкм при входе в пограничный слой составляет 200-1500 м/с и, как правило, превышает скорость более мелких частиц. Это связано с тем, что на дистанциях 50-70 мм от среза сопла плазмотрона скорость газового потока начинает снижаться независимо от эффекта пограничного слоя подложки, и субмикронные частицы замедляются активнее, чем крупные частицы.

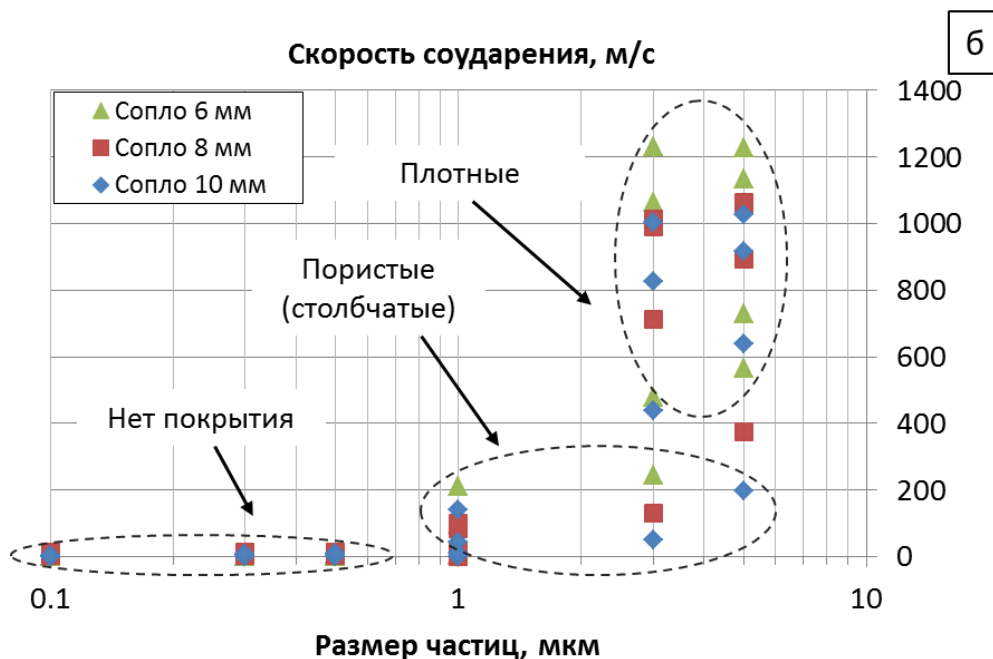
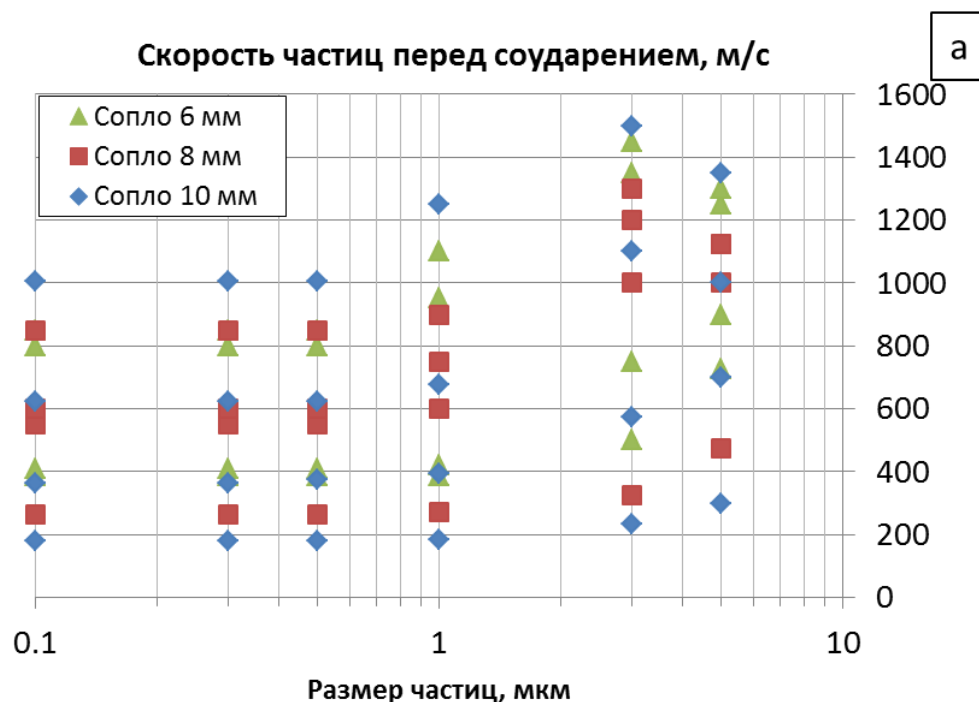


Рисунок 5 – Зависимость скорости частиц при входе в пограничный слой (а) и при соударении с поверхностью подложки (б) от их размера. Точка инъекции $r_{inj} = 0.1$ мм

С практической точки зрения наибольший интерес представляет анализ скорости частиц в момент соударения с подложкой. На рис. 5 (б) можно видеть, что во всех режимах напыления частицы размером 0.1-0.5 мкм снижают осевую скорость до нуля и огибают подложку по линиям тока газа, не соударяясь с ней. Очевидно, что такие частицы не будут участвовать в формировании покрытия. Важно подчеркнуть, что субмикронные частицы, имея скорость 200-1000 м/с, полностью теряют ее в пограничном слое.

Частицы размером 3-5 мкм практически во всех режимах (за исключением наиболее низкоскоростного $G_{nl}=1$ г/с) при соударении с поверхностью имеют высокую скорость 400-1200 м/с, потеря скорости в пограничном слое составляет 100-400 м/с. Такие высокие значения скорости на практике обеспечивают формирование покрытий с высокой плотностью. При низкой скорости потока частицы размером 3-5 мкм имеют низкую скорость соударения до 200 м/с, которая приводит к формированию пористых покрытий.

Диаметр частиц 1 мкм является критическим: в низкоскоростных режимах ($G_{nl}=1-3$ г/с), а также при инъекции вдали от оси струи, частицы отклоняются от подложки по линиям тока газа и не формируют покрытие; при высокоскоростных режимах напыления ($G_{nl}=5-7$ г/с) скорость соударения частиц составляет 10-150 м/с, что приводит к формированию пористых покрытий. Принимая во внимание, что малая осевая (нормальная к подложке) скорость таких частиц совмещена с высокой радиальной (касательной к подложке) скоростью 100-250 м/с, можно предполагать, что именно такие режимы напыления обеспечивают условия «затенения» поверхности подложки и формирования столбчатых структур, характерных для суспензионного напыления [17].

На рис. 6 показано обобщение результатов расчетов в терминах влияния критерия Стокса на скорость соударения с поверхностью частиц различных размеров. Для частиц размером 0.1-0.5 мкм число Стокса принимает значения $St=10^{-4} \dots 10^{-1}$, поэтому такие капли следуют линиям тока газового потока и не соударяются с поверхностью подложки. Для частиц размером 1 мкм число Стокса составляет $St=0.5 \cdot 10^{-1} \dots 5 \cdot 10^{-1}$, а для 3-5 мкм – $St=1-20$. Таким образом, результаты численных расчетов показали полное согласие с теоретическим критерием преодоления пограничного слоя частицами дисперсной фазы [18].

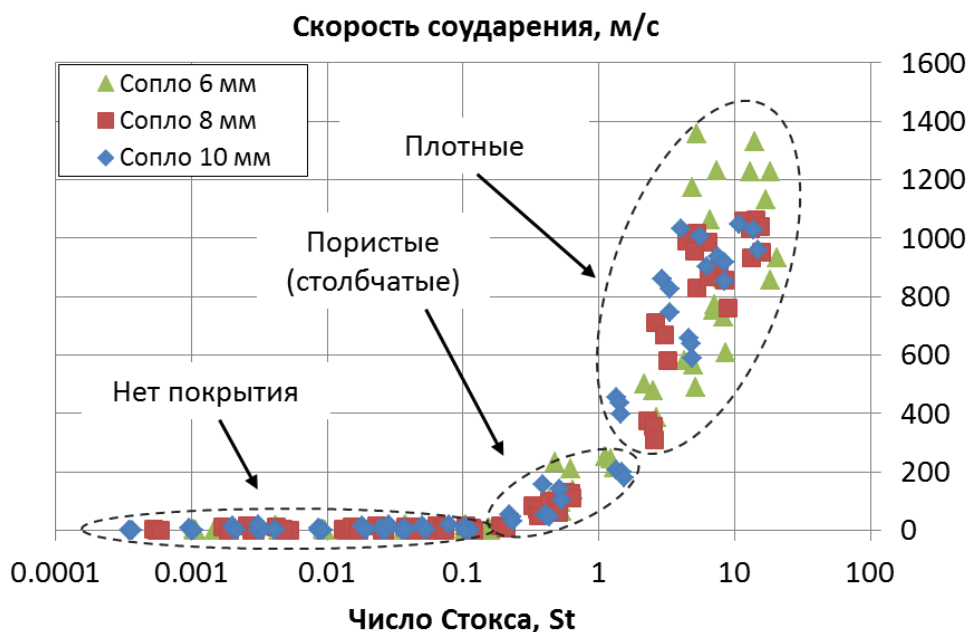


Рисунок 6 – Влияние числа Стокса на скорость соударения частиц ZrO_2 с поверхностью во всех изученных режимах напыления

Положение точки ввода частиц в поток (радиальной координаты) имеет одинаковое влияние на движение частиц во всех режимах: чем ближе к оси осуществляется инъекция, тем

большую скорость набирает частица. Такой траекторный эффект связан с тем, что в осевой области скорость (и температура) плазменного потока имеет максимальные значения [19; 21].

Выводы

Было проведено численное моделирование взаимодействия одиночных частиц напыляемого оксида циркония размером 0.1-5 мкм с плазменным потоком с использованием пакета Ansys Fluent 17.2. В расчётах использована геометрия канала плазматрона «ПНК-50» с соплами диаметром 6, 8, 10 мм, соответствующими условиям нанесения покрытий в экспериментах. Исследован диапазон расходов плазмообразующего газа $G_{пл}=1-7$ г/с. Подложка диаметром 25 мм (основа для нанесения покрытия) размещалась на расстоянии 80 мм от среза сопла плазматрона.

Полученные результаты численных расчетов позволяют сформулировать следующие выводы:

1. Частицы размером менее 1 мкм практически не участвуют в формировании покрытия вследствие их малой инерции.
2. Диапазон минимальных размеров частиц, на который следует ориентироваться в практических работах по жидкофазному плазменному напылению покрытий, составляет 1-3 мкм.
3. Условия газодинамического потока, благоприятные для формирования покрытия (соударение частиц с подложкой), могут быть обеспечены не только с помощью сопла с критическим диаметром 6 мм, но и 8 мм, и 10 мм.

Литература

1. Bakan, E. Ceramic Top Coats of Plasma-Sprayed Thermal Barrier Coatings: Materials, Processes, and Properties / E. Bakan, R. Vaßen // Journal of Thermal Spray Technology. – 2017. – Vol. 26. – P. 992–1010.
2. Thermal Plasma Spraying Applied on Solid Oxide Fuel Cells / D. Soysal, J. Arnold, P. Szabo [et al.] // Journal of Thermal Spray Technology. – 2013. – Vol. 22 (5). – P. 588–598.
3. Demands, Potentials, and Economic Aspects of Thermal Spraying with Suspensions: A Critical Review / F.-L. Toma, A. Potthoff, L.-M. Berger, C. Leyens // Journal of Thermal Spray Technology. – 2015. – Vol. 24 (7). – P. 1143–1152.
4. Liquid Feedstock Plasma Spraying: An Emerging Process for Advanced Thermal Barrier Coatings / N. Markocsan, M. Gupta, S. Joshi [et al.] // Journal of Thermal Spray Technology. – 2017. – Vol. 26 (7). – P. 1104–1114.
5. Jordan, E. The Solution Precursor Plasma Spray (SPPS) Process: A Review with Energy Considerations / E. Jordan, C. Jiang, M. Gell // Journal Thermal Spray Technology. – 2015. – Vol. 24 (7). – P. 1153–1165.
6. What Do We Know, What are the Current Limitations of Suspension Plasma Spraying / P. Fauchais, M. Vardelle, A. Vardelle, S. Goutier // Journal Thermal Spray Technology. – 2015. – Vol. 24 (7). – P. 1120–1129.
7. Killinger, A. What Do We Know, What are the Current Limitations of Suspension HVOF Spraying / A. Killinger, P. Muller, R. Gadow // Journal Thermal Spray Technology. – 2015. – Vol. 24 (7). – P. 1130–1142.
8. The key process parameters influencing formation of columnar microstructure in suspension plasma sprayed zirconia coatings / P. Sokołowski, S. Kozerski, L. Pawłowski, A. Ambroziak // Surface & Coatings Technology. – 2014. – Vol. 260. – P. 97–106.
9. Characterization of Microstructure and Thermal Properties of YSZ Coatings Obtained by Axial Suspension Plasma Spraying (ASPS) / A. Ganvir, N. Curry, S. Björklund [et al.] // Journal Thermal Spray Technology. – 2015. – Vol. 24 (7). – P. 1195–1204.

10. Three-Dimensional Analysis of the Suspension Plasma Spray Impinging on a Flat Substrate / M. Jadidi, M. Mousavi, S. Moghtadernejad, A. A. Dolatabadi // *Journal Thermal Spray Technology*. – 2015. – Vol. 24 (1-2). – P. 11–23.
11. Thermal-barrier coatings for more efficient gas-turbine engines : special issue MRS Bulletin. – 2012. – Vol. 37 (10). – 273 p.
12. Шляхтина, А. В. Синтез и свойства кислородпроводящих соединений семейства редкоземельных пироксидов : автореферат на соискание ученой степени доктора химических наук / А. В. Шляхтига. – Москва, 2010. – 46 с. – Текст : непосредственный.
13. Application of Suspension Plasma Spraying (SPS) for Manufacture of Ceramic Coatings / H. Kassner, R. Siegert, D. Hathiramani [et al.] // *Journal Thermal Spray Technology*. – 2008. – Vol. 17 (1). – P. 115–123.
14. Functional Performance of Gd₂Zr₂O₇/YSZ Multi-layered Thermal Barrier Coatings Deposited by Suspension Plasma Spray / S. Mahade, N. Curry, S. Bjorklund [et al.] // *Surface and Coatings Technology*. – Vol. 318. – P. 208–216.
15. Беляев, В. В. Верификация численной модели газодинамики сверхзвукового воздушного плазменного потока / В. В. Беляев, И. П. Гуляев. – Текст : непосредственный // *Высокопроизводительные вычислительные системы и технологии*. – 2018. – № 2 (9). – С. 47–53.
16. Варгафтик, Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н. Б. Варгафтик. – Москва : Наука, 1972. – 721 с.
17. Control of dispersed-phase temperature in plasma flows by the spectral-brightness pyrometry method / A.V. Dolmatov, I. P. Gulyaev, P. Yu. Gulyaev, V. I. Iordan // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2016. – Vol. 110. – P. 012058.
18. Гуляев, П. Ю. Моделирование технологических процессов плазменного напыления покрытий наноразмерной толщины / П. Ю. Гуляев, И. П. Гуляев. – Текст : непосредственный // *Системы управления и информационные технологии*. – 2009. – Т. 35, № 1-1. – С. 144–148.
19. Бороненко, М. П. Определение фундаментальной диаграммы потока ламинарного плазмотрона с постоянной подачей порошка / М. П. Бороненко, П. Ю. Гуляев, А. Л. Трифонов. – Текст : непосредственный // *Вестник Югорского государственного университета*. – 2012. – № 2 (25). – С. 16–20.
20. Thermal analysis of reaction producing K_xTiO₂ / K. Borodina, S. Sorokina, N. Blinova [et al.] // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. – 2018. – Vol. 131. – P. 561–566.
21. Бороненко, М. П. Измерение скорости и температуры частиц в потоке низкотемпературной плазмы / М. П. Бороненко, П. Ю. Гуляев, А. Е. Серегин. – Текст : непосредственный // *Известия высших учебных заведений. Физика*. – 2014. – Т. 57, № 3-2. – С. 70–73.