

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СТРУИ АРГОНА ПРИ ЕЕ ИСТЕЧЕНИИ ЧЕРЕЗ НАСАДКУ В ПРОЦЕССАХ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ

Булычев В.В.¹, Шевелев Д.В.¹, Коротков В.В.¹

¹ ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (Калужский филиал)», г. Калуга, Россия (248000, г. Калуга, ул. Баженова, д. 2), e-mail: k2kf@yandex.ru

В представленной статье разработана и исследована численная модель истечения высокотемпературной струи аргона через насадку и выявлены механизмы влияния насадки на параметры газового потока. Адекватность расчетной модели подтверждена сопоставлением результатов моделирования с известными экспериментальными данными. Показано, что при расположении торца насадки с углом раскрытия 30° и длиной 50 мм на расстоянии 10 мм от поверхности напыления возникает повторная эжекция горячего газа струи в зазоре между торцом насадки и напыляемой поверхностью. Образующийся вдоль стенок насадки встречный поток газа, состоящий как из атмосферного воздуха, так и из захваченного горячего газа струи приводит к повышению температуры струи газа, так и к увеличению объемной доли аргона в полости насадки. Разработанная расчетная схема может быть использована для анализа влияния геометрических параметров охлаждаемых насадок на распределение скоростей и температур в высокотемпературных аргоновых струях применительно к процессам плазменного напыления.

Ключевые слова: плазменное напыление, насадка, высокотемпературная струя аргона, численное моделирование, поле скоростей, поле температур, встречный поток.

NUMERICAL SIMULATION PARAMETERS HIGH JETS OF ARGON AT ITS EFFLUX THROUGH THE NOZZLE INTO THE PLASMA SPRAYING PROCESS

Boulichev V.V.¹, Shevelev D.V.¹, Korotkov V.V.¹

¹ Bauman Moscow State Technical University (Kaluga Branch), Kaluga, Russia (248000, Kaluga, st. Bazhenov, 2), e-mail: k2kf@yandex.ru

In this article developed and investigated a numerical model of the expiry of the high-temperature jet of argon through a nozzle and identified mechanisms of influence on the parameters of the nozzle of the gas stream. The adequacy of the estimated model is confirmed by comparing the simulation results with experimental data. It is shown that at the location of the nozzle end with an opening angle of 30 degrees and a length of 50 mm at a distance of 10 mm from the surface deposition occurs re- ejection of hot gas jet in the gap between the end of the nozzle and sprayed surface. Formed along the walls of the nozzle counter flow gas consisting of air as well as from a captured jet of hot gas raises the temperature of the gas jet and so to increase the volume fraction of argon in the nozzle cavity. The developed computational scheme can be used to analyze the effect of geometrical parameters cooled nozzles on the velocity and temperature distribution in high argon jets with respect to the processes of plasma spraying.

Keywords: plasma spraying, nozzle, high jet of argon, numerical simulation, the velocity field, temperature field, counter-flow.

Введение

Процессы плазменного напыления находят широкое применение при нанесении функциональных покрытий различного назначения на широкую номенклатуру деталей машин и механизмов. Прочность напыленных покрытий в значительной мере определяется эффективностью нагрева частиц напыляемого материала при их ускорении в высокотемпературной газовой струе. Особенностью истечения плазменных струй в затопленное пространство является резкое падение температуры струи из-за интенсивной эжекции атмосферного воздуха [1,4]. Как показано в работах [2,3,5,8,10], одним из

технологических приемов управления параметрами высокотемпературных газовых струй в процессах плазменного напыления является применение различных насадок, закрепляемых на срезе сопла плазмотрона и изменяющих условия тепло- и массообмена между струей и газом затопленного пространства. Однако, теоретические вопросы влияния насадок на параметры высокотемпературных газовых струй исследованы в настоящее время весьма недостаточно, что затрудняет дальнейшее совершенствование технологии плазменного напыления и применяемого оборудования. В представленной статье разработана и исследована численная модель истечения высокотемпературной струи аргона через насадку и выявлены механизмы влияния насадки на параметры газового потока.

Расчетная модель

При разработке расчетной модели истечения высокотемпературной струи аргона были приняты следующие допущения:

- модель воздуха и аргона – сжимаемая вязкая жидкость, теплофизические свойства подчиняются уравнению состояния идеального газа, вязкость является функцией температуры, $c_p / c_v = \text{const}$;
- режим истечения – установившийся;
- распределение скорости и температуры на срезе сопла – равномерное.

С учетом данных допущений в основу расчетной модели можно положить систему уравнений Навье – Стокса [7]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \\ \frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) + \frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i \\ \frac{\partial \rho h^*}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i h^*}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} (u_j (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R)) + \frac{\partial p}{\partial t} - \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho \varepsilon + S_i u_i + Q \end{cases}, (1)$$

где u – скорость; $i = 1, 2, 3$ – номера осей координат (x, y, z); ρ – плотность жидкости;

τ_{ij} – тензор касательных напряжений; τ_{ij}^R – тензор напряжений Рейнольдса; $h^* = h + \frac{u^2}{2}$ –

энтальпия потока по параметрам торможения; S_i – сила сопротивления, действующая на поток; Q – тепловыделение.

Численное решение системы уравнений движения вязкой жидкости (1) основано на алгоритме SIMPLE и k-ε модели турбулентности [9]. Для проведения расчетов приняли, что диаметр сопла плазмотрона составляет 5 мм, скорость истечения - 600 м/с, температура

струи на срезе сопла - 7000 К, в качестве газа затопленного пространства рассмотрели воздух.

Результаты исследования

С целью проверки адекватности расчетной модели результаты моделирования сопоставили с известными экспериментальными данными для струи аргоновой плазмы, приведенными в работе [6]. На рис. 1 представлены расчетные и экспериментальные кривые распределения температур и объемной доли аргона на оси струи. Видно, что расхождение между расчетными и экспериментальными значениями не превышает 10...15%.

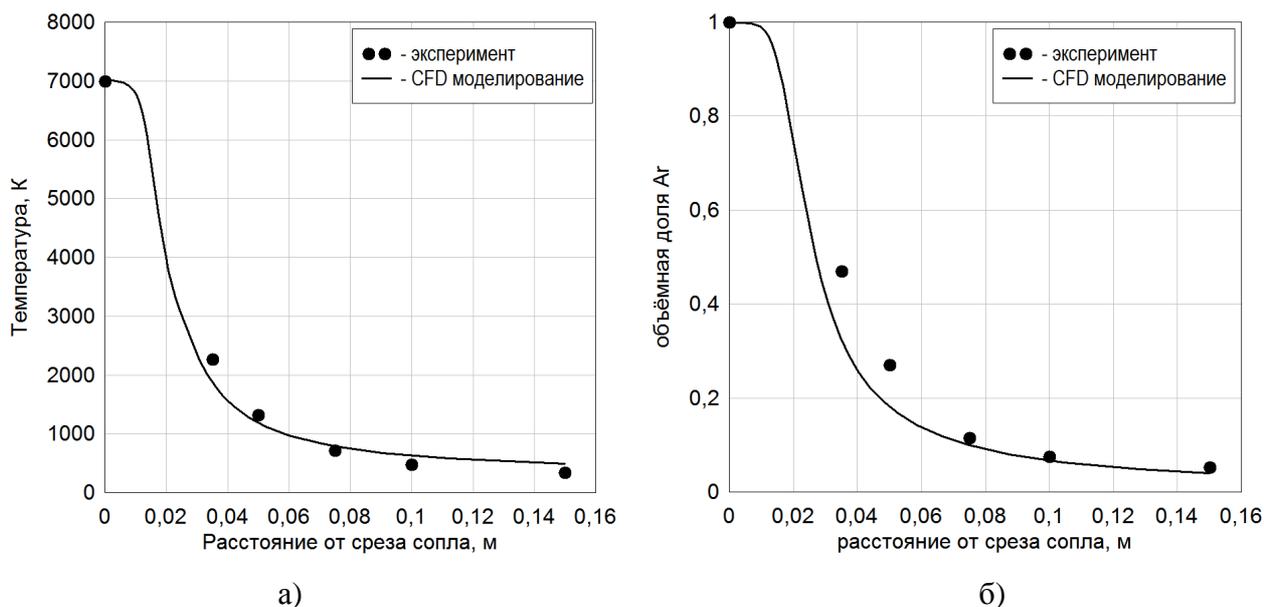


Рис.1. Расчетные и экспериментальные распределения температур (а) и объемной доли аргона (б) на оси струи

Таким образом, разработанная расчетная модель может быть использована для исследования особенностей истечения высокотемпературной струи аргона через насадку. Геометрические параметры насадки и расчетная схема истечения струи представлены на рис. 2. При расчетах приняли допущение о том, что температура насадки в процессе истечения высокотемпературной газовой струи не меняется и составляет 293 К, что близко к условиям применения медных охлаждаемых насадок. Расчеты показали, что применение насадки замедляет падение осевой температуры струи (рис.3,а). Так на выходе из насадки осевая температура струи примерно на 250 К выше, чем на этом же удалении от среза сопла плазматрона без применения насадки.

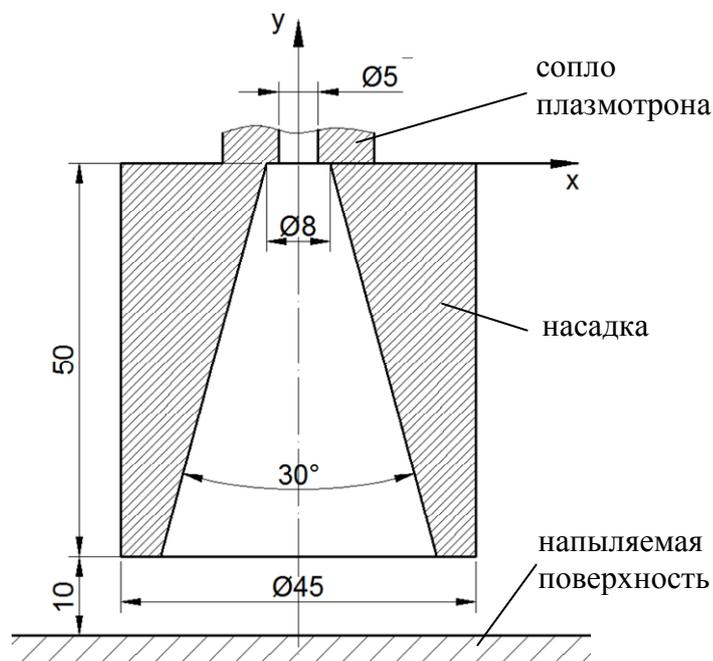


Рис.2. Геометрические параметры насадки и расчетная схема истечения струи

Существенно влияние насадки на распределение температур в поперечных сечениях струи. Так, на удалении 50 мм от среза сопла плазмотрона применение насадки приводит к повышению температур в периферийных зонах струи на 100...150 К, а на оси до 200 К (рис. 3,б).

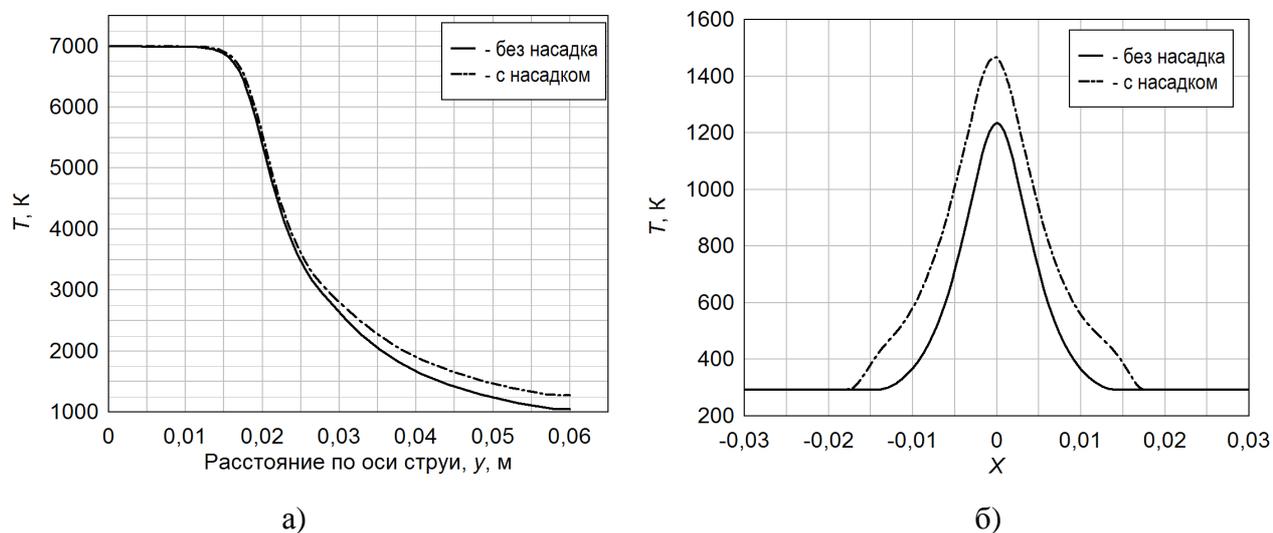


Рис. 3. Распределение температуры на оси струи (а) и в поперечном сечении струи на расстоянии 50 мм от среза сопла плазмотрона (б)

Влияние насадки на поле скоростей газового потока менее значительно. Так, практически не изменяется скорость газового потока по оси струи (рис. 4,а).

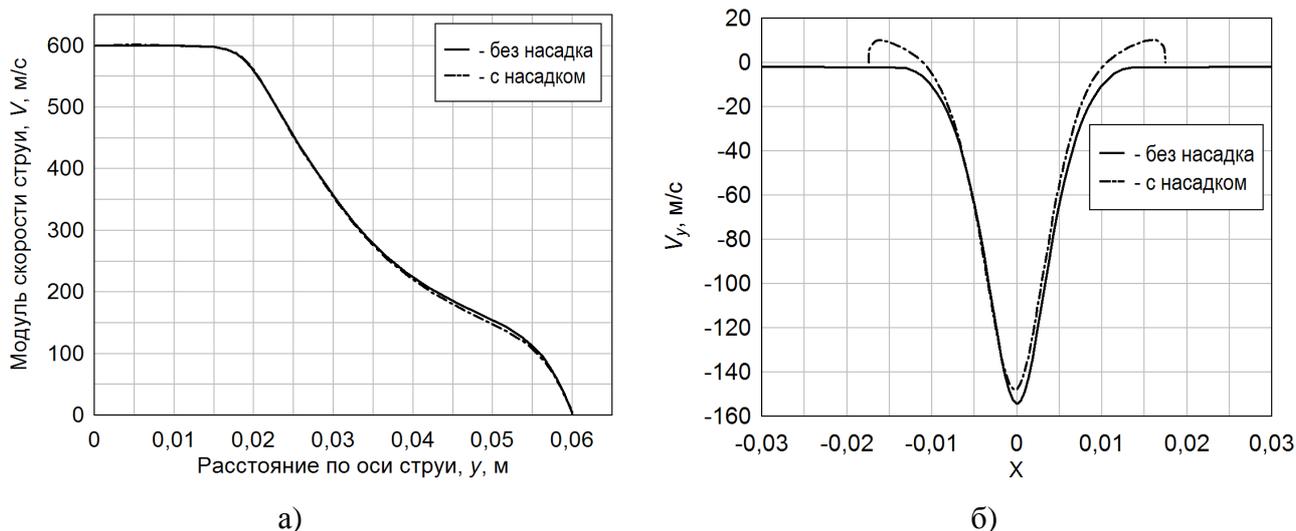


Рис.4. – Распределение модуля скорости по оси струи а) и осевой компоненты скорости в поперечном сечении струи на расстоянии 50 мм от среза сопла плазмоторона б)

Как без насадки, так и с применением насадки, протяженность начального участка струи составляет около 15 мм. Мало изменяется и поперечный профиль скоростей в струе. В то же время, как показали расчеты, при использовании насадки вдоль ее стенок возникает обратный направлению истечения струи газовый поток с максимальной скоростью около 10 м/с (рис. 4,б).

Причиной возникновения данного потока является эжекция атмосферного воздуха газовой струей, а практическое отсутствие влияния насадки на поле скоростей в струе может быть объяснено тормозящим действием встречного газового потока вдоль стенок насадки.

На основании вышеизложенного было предположено, что влияние насадки на распределение температур в струе вызвано, в первую очередь, изменением условий массообмена между струей и атмосферным воздухом. Для проверки этого предположения был выполнен расчет объемной доли аргона в струе. Расчеты показали, что с удалением от среза сопла плазмоторона влияние насадки на увеличение объемной доли аргона в струе возрастает (рис. 5,а) и у торца насадки (на удалении 50 мм от среза сопла плазмоторона) объемная доля аргона в поперечном сечении струи возрастает более, чем на 20 % по сравнению со случаем истечения струи при отсутствии насадки (рис. 5,б).

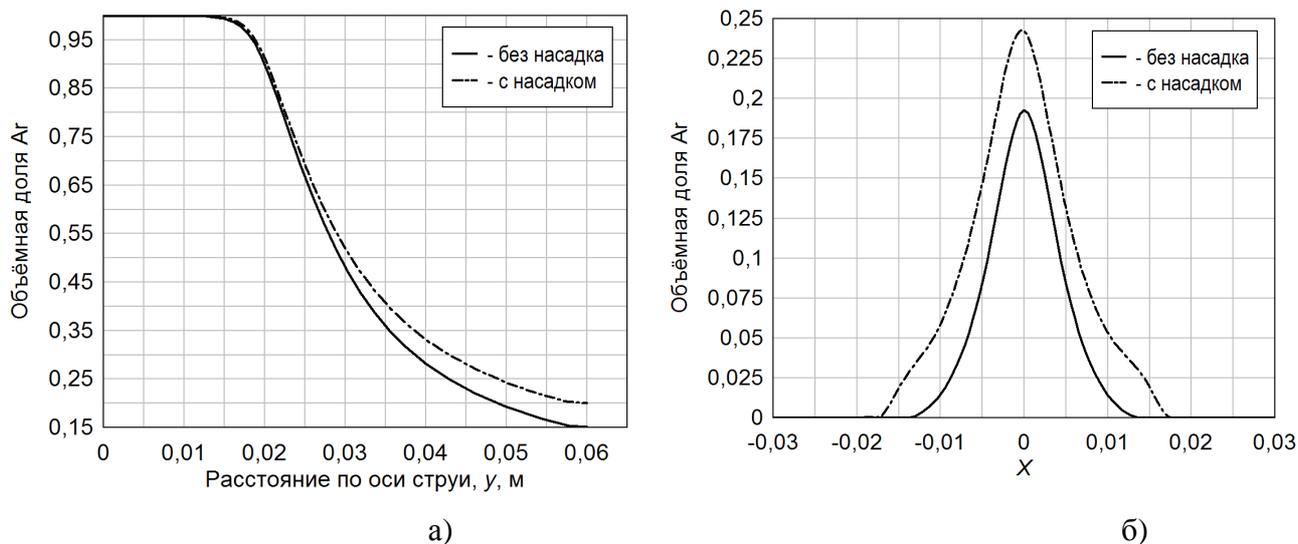


Рис. 5. Распределение объёмной доли аргона на оси струи а) и в поперечном сечении струи на расстоянии 50 мм от среза сопла плазмотрона б)

Важным является также то, что, как следует из рис. 5,а, аргон участвует в формировании встречного потока вдоль стенок насадки. Такое распределение аргона в полости насадки можно объяснить повторной эжекцией газа струи в зазоре между торцом насадки и напыляемой поверхностью. Участие горячего газа струи в формировании встречного потока можно объяснить и повышением температуры во всей полости охлаждаемой насадки, как это видно на рис. 3,б.

Таким образом, применение насадки с углом раскрытия 30° и длиной 50 мм позволяет повысить температуру в периферийных областях газовой струи, что является важным для улучшения условий нагрева периферийных частиц и повышения прочности напыленного покрытия. Разработанная расчетная схема может быть использована для анализа влияния геометрических параметров охлаждаемых насадок на распределение скоростей и температур в высокотемпературных аргоновых струях применительно к процессам плазменного напыления.

Выводы

1. Расчетная модель на основании системы уравнений Навье – Стокса может быть использована для моделирования истечения высокотемпературных струй аргона в процессах плазменного напыления, в том числе, и в условиях применения насадок различной геометрии.
2. Применение насадки к плазмотрону с углом раскрытия 30° и длиной 50 мм мало влияет на изменение скоростей потока в струе, но оказывает существенное влияние на распределение температур во всей полости насадка.
3. Причиной повышения температуры струи является повторная эжекция горячего газа струи в зазоре между торцом насадки и напыляемой поверхностью.

Список литературы

1. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. - М.: Наука, 1984.- 720 с.
2. Анализ распределения скоростей и удельной энтальпии частиц по радиусу пятна напыления при использовании конической насадки/ В.В. Кудинов и др.// Физика и химия обраб. материалов. – 1992. - № 5. - С.82-85.
3. Булычев В.В. Разработка процесса напыления порошковых материалов плазмотроном с насадкой: Автореф. дис. канд. техн. наук. – Калуга, 1996. – 16с.
4. Жуков М.Ф., Солоненко О.П. Высокотемпературные запыленные струи в процессах обработки порошковых материалов. - Новосибирск: ИТ СО АН СССР, 1990. - 516 с.
5. Кудинов В.В., Косолапов А.Н., Пекшев П.Ю. Насадки для создания местной защиты при плазменном напылении. // Изв. СО АН СССР, Сер. техн. наук. - 1987. - №6. - Вып. 21. - С. 69-75.
6. Кудинов В.В. Плазменные покрытия. – М.:Наука, 1977. – 184 с.
7. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Дрофа, 2003. – 840 с.
8. Максимов В.В. Исследование процесса и разработка технологии плазменного напыления композиционных материалов на детали ГТД плазмотроном с защитным насадком: Автореф. дис. канд. техн. наук. - Куйбышев, 1987.- 16 с.
9. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости.– М.: Энергоатомиздат, 1984. – 154 с.
10. Steffens H.D., Busse K.H., Gerate und Einrichtungen zur Beschichtung von technischen Oberflächen durch Plasmaspritzen. //Elektrowarme international 45 (1987). - В3/4, Yuni/ August. - В.183 - 189.

Рецензенты:

Косушкин В.Г., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Калужский филиал), г.Калуга.

Шаталов В.К., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Калужский филиал), г.Калуга.