

Научная статья
УДК 620.18:621.791
doi:10.30987/2223-4608-2022-1-11-20

О выборе критериев эффективности газовихревой стабилизации плазмотронов

Сергей Вадимович Анахов¹, к.-ф.м.н.,

Анатолий Владимирович Матушкин², к.т.н., **Юрий Анатольевич Пыкин³**, д.т.н.

¹Российский государственный профессионально-педагогический университет г. Екатеринбург, Россия,

²Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, Россия,

³Уральский государственный лесотехнический университет, г. Екатеринбург, Россия

¹s_anakhov@yahoo.com, <https://orcid.org/0000-0003-1460-6305>

²227433@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7309-1618>

³yappoligon@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4990-2956>

Аннотация. Представлено обоснование принципов оценки эффективности газовихревой стабилизации плазмотронов. С учетом новых возможностей методов численного моделирования введены новые критерии, применение которых позволяет провести как разработку новых способов газовихревой стабилизации, так и использовать их при оценке результатов проектирования плазменного оборудования.

Ключевые слова: плазмотрон, проектирование, газодинамика, газовихревая стабилизация, численное моделирование, эффективность, воздушно-плазменная резка

Для цитирования: Анахов С.В., Матушкин А.В., Пыкин Ю.А. О комплексной оценке эффективности газовихревой стабилизации плазмотронов // Наукоёмкие технологии в машиностроении. – 2022. – №1(127). – С. 11-20.
doi:10.30987/2223-4608-2022-1-11-20.

Original article

Sergey V. Anakhov¹, Cand.Sc.Physics and Mathematics,

Anatoly V. Matushkin², Cand. Sc. Engineering, **Yuriy A. Pykin³**, IR DR

¹Russian State Vocational Pedagogical University Yekaterinburg, Russia,

²Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia,

³Ural State Forestry Engineering University, Yekaterinburg, Russia

On the choice of criteria for the effectiveness of gas-vortex stabilization of plasma torches

Annotation. A rationale of the principles of evaluating the effectiveness of gas-vortex stabilization of plasma torches has been provided. Taking into account the new possibilities of numerical modeling methods, new criteria have been introduced, their application allows both the developing of new gas-vortex stabilization methods and their using for evaluating the results of plasma equipment designing.

Keywords: plasma torch, designing, gas dynamics, gas-vortex stabilization, numerical modeling, effectiveness, air plasma cutting

For citation: Anakhov S.V., Matushkin A.V., Pykin Yu.A. Substantive evaluation of the effectiveness of gas-vortex stabilization of plasma torches. / Science intensive technologies in mechanical engineering, 2022, No.1(127), pp. 11-20.
doi: 10.30987/2223-4608-2022-1-11-20.

Введение

Воздушно-плазменная резка – одна из наиболее широко применяемых технологий в

многочисленных отраслях промышленного и гражданского производства (машиностроение, топливно-энергетический и оборонный комплексы, инженерная экология и т.д.) [1]. Ос-

новые принципы конструирования плазмотронов для таких технологий были разработаны в последней четверти XX в. [2, 3]. Для повышения эффективности и качества плазменной резки необходимо при проектировании новых плазмотронов обращать внимание, в первую очередь, на повышение эффективности применяемой системы газодинамической стабилизации (ГДС) плазменной дуги [4].

Материалы и методы

В технологиях плазменной резки, как правило, применяется воздух в качестве плазмообразующей среды. Это позволяет, с одной стороны, удешевить процесс резки (по сравнению с применением кислорода, азота), но с другой, побуждает для обеспечения стабильности и устойчивости горения дуги использовать газовихревую систему стабилизации (ГВС) плазмообразующего газа (ПОГ). Существуют различные ГВС, в которых подача газа в зону электрода (рис. 1) может осуществляться с использованием либо одного, либо двух потоков газа (рабочего тела) по каналам, расположенным по касательной к стенкам дуговой камеры, с применением разных вариантов специальных устройств – завихрителей (вихревых камер).

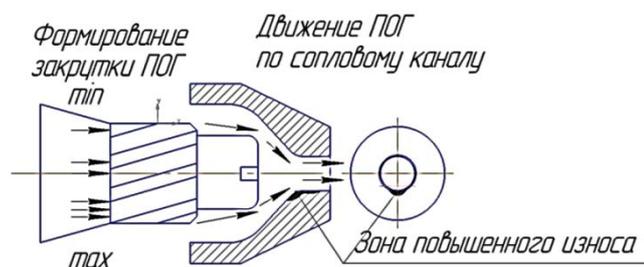


Рис. 1. Схема работы системы газовихревой стабилизации плазмотрона

В завихрителе создаётся спиралевидный вихревой поток, обжимающий столб дуги и изолирующий его от стенок, как в открытой части соплового узла, так и в дуговом канале сопла. Вихревой поток интенсифицирует плазмообразование за счет перемешивания газа в столбе дуги, увеличивает напряжение плазменного столба, обеспечивает фиксацию катодного пятна в пределах термохимической катодной вставки. В конце 1960-х г.г. [5] по результатам обработки большого массива экспериментальных данных был определен ряд газодинамических критериев, обеспечиваю-

щих эффективность ГВС – например, отношение тангенциальной составляющей скорости газа v_t к осевой v_o (показатель степени закрутки газа) должно быть в пределах 7...12. Однако многие вопросы, связанные с зависимостью движения опорного пятна дуги от скорости закрученного потока газа, в те годы были ещё недостаточно изучены.

Создание в последующие годы новых конструкций вихревых камер позволило увеличить скорости истечения газа за счет уменьшения площади сечения канавок завихрителя при одновременном увеличении давления и расхода. Наиболее часто в завихрителе системы ГВС использовалось шесть спирально расположенных каналов с правой нарезкой, выполненных с углом закрутки α , при общем сечении каналов завихрителя меньшим сечения канала сопла.

Для улучшения качества реза было предложено применение дополнительного обжатия дуги за счет уменьшения диаметра сопла, а также использование вторичного потока газа, обеспечивающего стабилизацию плазменной дуги (струи) за пределами сопла плазмотрона. Последний способ используется в технологии «узкоструйной (точной или сжатой) плазмы», получившей свое применение уже в XXI в. в плазмотронах серии Nu Performance (Hyper Therm, США), Fine Cut (Kjelberg, Германия) и ряда других серий и производителей.

Обобщение экспериментальных данных позволило определить оптимальные значения окружной скорости газа на входе в вихревую камеру плазмотрона в 150...200 м/с при средней осевой скорости по сечению в направлении потока, определенной по холодному газу, не менее 30 м/с и значительном радиальном градиенте давления (до 2 атм/мм) в вихревом и сопловом канале соплового узла. Для выполнения подобных критериев были сделаны следующие рекомендации по части проектирования системы ГВС [6 – 8]:

1. Отношение площади сечения диаметра кольца закрутки к площади сечения диаметра выходного электрода должно составлять 3,5...5,0.

2. Количество отверстий в кольце закрутки – не менее четырех с равномерным расположением по окружности; суммарная площадь проходных сечений должна обеспечивать скорость истечения газа порядка 0,3...0,5 скорости звука.

3. Протяженность тангенциальных каналов в кольце закрутки (для получения острона-

правленной струи газа) должно быть не менее 3 – 4 калибров.

4. Величина межэлектродного зазора в плазматронах с самоустанавливающейся длиной дуги при работе на воздухе в зависимости от мощности плазматрона и расхода газа – 2...5 мм.

5. Сечение F цилиндрической электродуговой камеры должно быть не меньше того значения, при котором в конце нее, при заданных значениях расхода G и температуре подогрева газа, устанавливается скорость звука, $F > G/(\rho_{кр}a_{кр})$.

6. Расчет диаметра сопла производится по соотношению:

$$d = 2(1,2...2,0)[G/\pi\rho_{кр}a_{кр}],$$

где $a_{кр}$, $\rho_{кр}$ – скорость звука и плотность рабочего газа в критическом сечении электродуговой камеры соответственно, а коэффициент выбирается в зависимости от давления газа.

Следует заметить, что данные рекомендации были сформулированы при отсутствии строгой теории вихревого течения в электродуговой камере плазматрона и приводятся в качестве основных принципов проектирования ГВС и в большинстве последних изданий [9]. На взгляд авторов, современные возможности численного моделирования газодинамических процессов (CFD – computational fluid dynamics) позволяют провести их корректировку и сформулировать дополнительные критерии, позволяющие оценить эффективность систем ГВС уже на стадии проектирования.

Основным результатом газодинамического анализа является определение критериев эффективности ГВС в области формирования плазменной дуги (сопловом узле) и в зоне воздействия на поверхность металла, обеспечивающих высокую степень прецизионности плазменной резки. При определении основных критериев, в этой связи, следует обращать внимание на повышение кинетических параметров и степени равномерности распределения газодинамических характеристик газоплазменного вихревого потока, а также формирование геометрии высокоэнергетичного ядра плазменной дуги (струи).

Применение CFD-методов позволило авторам провести газодинамический и теплофизический анализ большого числа систем ГВС металлорежущих плазматронов. По результатам проведенного анализа были предложены дополнительные критерии эффективности

систем ГВС и сформулированы рекомендации по их проектированию.

Характерная конструкция газовоздушного тракта (ГВТ) дугового металлорежущего плазматрона (рис. 2) включает в себя участок подачи газа в плазматрон, успокоительную (расширительную) камеру и систему ГВС, обеспечивающую тангенциальную подачу ПОГ из завихрителя (вихревой камеры) в сопловой узел. Как показал проведенный анализ [10], проблемы производительности и качества плазменной резки, во многом, обусловлены неравномерностью распределения параметров газового потока по сечению ГВТ, вызванной применением общепринятого асимметричного способа подачи ПОГ в расширительную камеру, которая в силу ограниченности своих размеров не успевает сформировать равномерный газовый поток перед его распределением по каналам завихрителя.

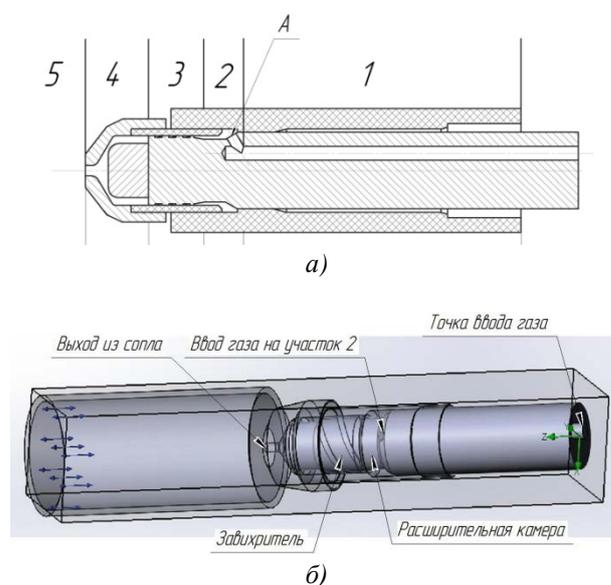


Рис. 2. Схема газовоздушного тракта металлорежущего плазматрона линейной схемы ПМВР-М с системой ГВС:

a – конструктивная схема; b – расчетная схема; участки ГВТ: 1 – ввод ПОГ в плазматрон; 2 – расширительная камера; 3 – завихритель; 4 – сопловой узел; 5 – выход плазмы; A – точка ввода ПОГ из участка 1 в участок 2

Подобная асимметрия сохраняется и при прохождении ПОГ через сопловой узел, вызывая упомянутые негативные эффекты. В качестве основных анализируемых параметров при определении критерия эффективности ГВС следует рассмотреть распределение локальных скоростей, удельных массовых рас-

ходов и энергий ПОГ. Для оценки неравномерности распределения газового потока на стадии проектирования используют программные средства системы автоматизированного расчета и конструирования САД или САЕ (со встроенными средствами анализа типа COSMOS/FloWorks или EFD.lab для SolidWorks), позволяющие производить расчеты газодинамических параметров в заданных точках ГВТ. Очевидно, что абсолютно равномерный поток должен характеризоваться равенством параметров во всех симметричных точках, выбранных для сравнительного анализа расчетных траекторий.

В качестве расчетных траекторий, в первую очередь, целесообразно рассмотреть сечения ГВТ плазмотрона. Для выбора оптимальных конструктивных решений отдельных участков ГВТ (расширительной камеры, завихрителей, соплового узла и их сопрягающих элементов) следует начать анализ от точки ввода ПОГ в первую расширительную камеру и далее вести его вплоть до цилиндрического канала соплового узла плазмотрона, определяя наиболее эффективные конструкции при минимальных геометрических размерах отдельных участков ГВТ. Контрольные сечения в этом случае будут иметь кольцевую или круговую форму (за исключением сечений в каналах завихрителей), а в качестве расчетной траектории целесообразно взять окружность с радиусом, равным радиусу средней линии контрольного сечения.

Процесс определения равномерности распределения динамических характеристик газового потока зависит от аппаратных возможностей применения программного комплекса и требуемой точности вычислений. При ограниченных ресурсах (в том числе временных) можно ограничиться расчетом параметров потока ПОГ в 4-х симметричных точках в выбранных сечениях плазмотрона (рис. 3). Причем одна из точек выбирается напротив точки ввода газа в расширительную камеру. Определяющим критерием эффективности ГВС должно стать распределение параметров в цилиндрическом канале соплового узла плазмотрона, в наибольшей степени ответственного за формирование плазменной дуги и газоплазменных потоков струйного истечения за пределами ГВТ (на выходе из плазмотрона).

Степень неравномерности распределения скорости потока по сечению ГВТ плазмотрона в этом случае можно оценить путем нахождения отношений

– скоростей (см. рис. 3):

$$K_{v_i} = v_1/v_2 = v_1/v_3 = v_1/v_4; \quad (1)$$

– удельных расходов:

$$K_{Q_i} = Q_1/Q_2 = Q_1/Q_3 = Q_1/Q_4, \quad (2)$$

где v_i – локальная скорость; $Q_i = \rho_i v_i$ – удельный расход; ρ_i – плотность потока ПОГ в i -й контрольной точке.

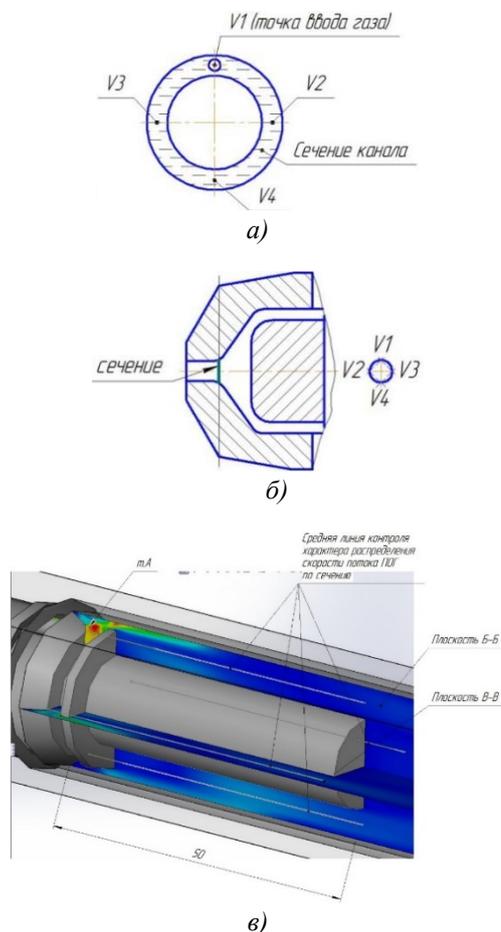


Рис. 3. Расположение точек расчета и участков контроля параметров потока ПОГ:

a – по сечению каналов ГВТ; *б* – в контрольной плоскости; *в* – линии контроля (А – ввод ПОГ в камеру расширения; плоскость Б – Б проходит через контрольные точки v_1 и v_3 , В – В – через v_2 и v_4)

Анализ неравномерности следует провести по всему ГВТ (начиная с расширительной камеры), так как это позволит выявить участки, требующие конструктивных изменений. Расчет скоростей выполняют по круговым траекториям контрольных сечений ГВТ (см. рис. 3, *a*, *б*) и по осевым линиям в направлении движения потока газа (см. рис. 3, *в*). Для упрощения расчета можно его выполнять на холодной струе газа, так как нагрев ПОГ происходит в сопловом канале ГВТ, а равномерность распределения ПОГ должна быть обеспечена уже

на входе в сопловую камеру. Очевидно, что равномерное распределение должно иметь K_{vi} и K_{Qi} равными или близкими к единичному значению.

Современные возможности численного моделирования позволяют получить массив данных, состоящих из результатов расчета большого числа контрольных точек, взятых по периметру контрольной линии. В этом случае следует воспользоваться статистическими методами, а в качестве критериев равномерности распределения использовать следующие параметры (формулы приведены на примере анализа массива данных скорости v_i):

- 1) размах вариации $R = v_{\max} - v_{\min}$;
- 2) отношение вариации $L = v_{\max}/v_{\min}$;
- 3) среднее линейное отклонение (СЛО):
 $a = \sum_{i=1}^n |v_i - \bar{v}|/n$;
- 4) среднее квадратическое отклонение (СКО): $S = \sqrt{\sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2/n}$;
- 5) коэффициент линейных отклонений (КЛО): $Z = a/\bar{v}$;
- 6) коэффициент вариации $F = S/\bar{v}$. При больших объемах выборки ($n > 40$) $S \approx \sigma$, где σ – дисперсия случайной величины.

Строгий выбор критерия равномерности из представленных выше параметров должен быть основан на предварительном статистическом анализе массива расчетных данных в контрольных точках. Очевидно, что применение для оценки равномерности таких параметров как R , L , a и Z может иметь достаточно универсальный характер, в то время, как параметры S и F (СКО и коэффициент вариации) предпочтительно использовать тогда, когда распределение данных подчиняется критериям нормального распределения. Для подобного выбора можно дополнительно использовать ряд известных статистических характеристик – асимметрию A и эксцесс E кривой распределения.

$$A = \frac{\sum(v_i - \bar{v})^3}{n \cdot \sigma^3} \quad (3)$$

$$E = \frac{\sum(v_i - \bar{v})^4}{n \cdot \sigma^4} - 3. \quad (4)$$

Как известно, асимметрия – это показатель симметричности/скошенности кривой распределения, а эксцесс определяет ее островершинность. У всех симметричных распределений (в том числе и у нормального распределения) величина асимметрии A равна нулю. При этом если в распределении преобладают значения близкие к среднему арифметическому (ситуация, характерная для равномерного распределения), то формируется островершинное

распределение с положительным показателем эксцесса E .

Распределение оценивается как предположительно близкое к нормальному, если:

$$|A| \geq 3 \cdot \sqrt{\frac{6}{n}}, \quad |E| \geq 6 \cdot \sqrt{\frac{6}{n}}. \quad (5)$$

В противном случае распределение считать нормальным нельзя.

С учетом данных критериев следует оценивать равномерность распределения по критериям S и F при соблюдении требований (5) к анализируемому массиву данных, обращая дополнительное внимание на величины эксцесса E и асимметрии A (более равномерное распределение является более высоким – «островершинным» с большим положительным значением E и наиболее симметричным при $|A| < 0,25$). При несоблюдении критериев (5) целесообразно для оценки равномерности распределения использовать среднее линейное отклонение (СЛО) или коэффициент линейных отклонений Z , обращая внимание при сравнительном анализе на упомянутые выше значения E и A .

Результаты и обсуждение

В качестве иллюстрации применения представленной методики на рис. 4 и в табл. 1 показано исследование эффективности ГВС с двумя различными вариантами завихрителей в плазмотроне ПМВР-5.3. Конструктивное различие завихрителей – в различных углах наклона направляющих каналов по отношению к оси ГВТ. По результатам анализа расчетного массива скоростей v_i ($n = 200$ точек) делаем вывод о нормальном характере распределения скоростей ($|A| \geq 0,52, |E| \geq 1,04$), а, следовательно, о применении для сравнения в качестве определяющего параметра коэффициента вариации F . Как видно из сравнения параметров (см. табл. 1) завихритель 1 демонстрирует как большую эффективность ГВС, так и более высокие кинетические характеристики потока ПОГ в контрольном сечении соплового узла плазмотрона.

Анализ эффективности проектирования плазмотронов помимо определения динамических параметров ПОГ в пределах ГВТ целесообразно дополнить исследованиями параметров струйного истечения за пределами соплового узла. Однако расчет параметров струи по кольцевым траекториям контрольных сечений в этом случае становится весьма затрудни-

тельным из-за сложной геометрии струи, связанной с наличием характерного для любого

струйного истечения в открытое пространство с атмосферным давлением расширения.

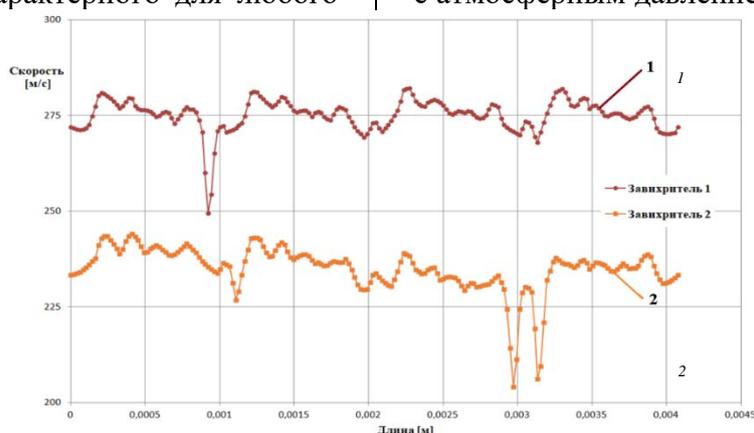


Рис. 4. Распределения скоростей в контрольном сечении на входе в цилиндрический канал соплового узла плазмотрона ПМВР-5.3 с завихрителем 1 (1) и завихрителем 2 (2)

1. Параметры распределения скоростей в контрольном сечении на входе в цилиндрический канал соплового узла плазмотрона ПМВР-5.3

Завихритель	Параметры распределения скоростей										
	$\langle v \rangle$	v_{max}	v_{min}	R	L	a	S	Z	F	A	E
1	275	282	249	33	1,13	2,9	4,1	0,015	0,015	-2,1	10,2
2	235	244	204	40	1,20	3,9	5,9	0,017	0,025	-2,3	8,7

По этой причине для оценки газодинамической эффективности ГДС рассмотрим методы расчета параметров струи либо по параллельным центральной оси плазменной струи равноотстоящим линейным траекториям (рис. 5, а), либо по П-образной траектории (рис. 5, б) с геометрией, определяемой диаметром сопла, размером зоны плазменной дуги с максимальной температурой и характерным для плазменной резки расстоянием от среза сопла до нижней кромки разрезаемого металла (как правило, в пределах 40 мм). Анализ полученных результатов выявляет не только асимметрию распределения, но и динамику изменения параметров по мере удаления от среза сопла плазмотрона. Расчет по П-образной траектории позволяет дополнительно оценить степень равномерности распределения параметров и газодинамического воздействия в зоне воздействия на металл, существенным образом определяющих эффективность и качество плазменной резки.

Применение современных методов численного моделирования газодинамических параметров (CFD) позволяет помимо существенных для технологии плазменной резки характеристик (скорость, температура, давление, удельный расход и энергия) сделать расчет ряда параметров, анализ которых допол-

няет и облегчает принятие заключения об эффективности работы системы ГВС плазмотрона. Среди таких параметров можно выделить завихренность, интенсивность турбулентности (I) и число Кармана (Ka).

Завихренность (ротор, вихрь, спиннинг движения) – важная характеристика векторного поля скоростей газового потока, вычисляемая посредством определения дифференциального оператора $rot \vec{v}$ и пропорциональная вектору угловой скорости бесконечно малой частицы данного потока (6). Последний вывод можно получить, рассмотрев движение потока вблизи некоторой точки O как сумму поступательного (вектор v_0) и вращательного движения (7).

$$rot \vec{v} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ v_x & v_y & v_z \end{vmatrix} = [\nabla, \vec{v}] = 2\vec{\omega}, \quad (6)$$

где

$$\vec{v} = \vec{v}(r) = \vec{v}_0 + \vec{\omega} \times \vec{r}, \quad (7)$$

v – скорость точки O газового потока; v_0 – осевая (поступательная скорость); ω – угловая скорость; r – радиус-вектор положения точки O .

Исходя из анализа приведенных определений, можно сделать вывод, что векторное безвихревое (потенциальное) поле будет иметь нулевую завихренность в любой точке, а не-

обходимый для стабилизации плазменной дуги вихревой эффект будет характеризоваться ненулевой величиной (знак будет указывать на направление вращения относительно направления поступательного (осевого) движения потока). Таким образом, при сравнительном определении эффективности ГВС желательно обращать внимание на ненулевое значение завихренности газового (плазменного) потока при наиболее равномерном ее распределении в массиве расчетных точек контрольного сечения.

Ещё одним параметром, который можно принимать во внимание при анализе вихревых потоков ПОГ как внутри ГВТ плазмотрона, так и в плазменной струе, является интенсивность турбулентности I (Turbulence Intensity), эквивалентная по определению такому физическому понятию как число Кармана (Ka). Согласно определению, интенсивность турбулентности I определяется как отношение среднеквадратичной пульсации скорости v' к ее осредненному значению \bar{v} :

$$I = \frac{\bar{v}'}{\bar{v}} = \frac{1}{\bar{v}} \sqrt{\frac{1}{3} (v_x'^2 + v_y'^2 + v_z'^2)}. \quad (8)$$

Принято считать, что сильно турбулизованное (вихревое) высокоскоростное течение имеет значения I в пределах 0,05...0,2 (5...20 %), течение со средней турбулентностью – в пределах 0,01...0,05 (1...5 %), низкотурбулентные (ламинарные) течения с невысокой скоростью – менее 0,01 (1 %).

В ряде опубликованных ранее авторских работ [11, 12] можно найти примеры оценки эффективности ГДС, сделанных по результатам расчета по круговым (в контрольных сечениях ГВТ плазмотронов – см. рис. 3) и по линейным траекториям (в пространстве истечения газо-плазменной струи – см. рис. 5, а).

Для иллюстрации применимости новых критериев эффективности приведем результаты сравнительного анализа трех плазмотронов, в разные годы разработанных авторским коллективом (рис. 6): ПМВР-М – однопоточный плазмотрон с несимметричной подачей ПОГ и одним завихрителем в ГВС (разработка ООО НПО «Полигон» начала 2000-х г.г.); ПМВР-5.3 – однопоточный плазмотрон для прецизионной резки с симметричной подачей ПОГ в ГВТ и двумя завихрителями в системе ГВС [13]; ПМВР-9.1 – двухпоточный плазмотрон для прецизионной резки, работающий по импортозамещающей технологии «узкоструйной плазмы».

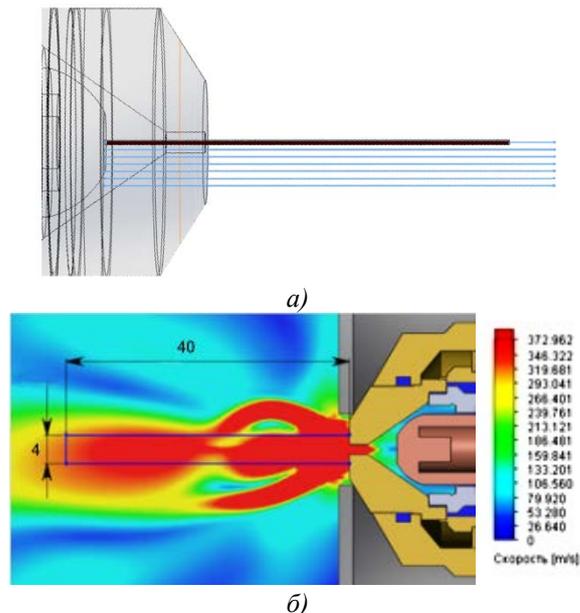


Рис. 5. Схема расчета параметров плазменной струи:

а – по линейным траекториям; б – по П-образной траектории



Рис. 6. Металлорежущие плазмотроны серии ПМВР

На рис. 7 представлены результаты CFD-анализа, проведенного на модельной (холод-

ной) струе генерируемой плазмотроном ПМВР-5.3, для одного из таких параметров – завихренности. Как видно из графика, завихренность уменьшается в сечении струи от оси к периферии, характеризуя тем самым более высокую степень обжата и стабилизации высокоэнергетического ядра плазменной струи.

Связанные с влиянием расширения струи на начальном участке ее истечения значительные колебания степени завихренности стабилизируются на удалении более 20 мм от среза сопла, сохраняя тем не менее вихревой характер течения на всем протяжении расчетных траекторий.

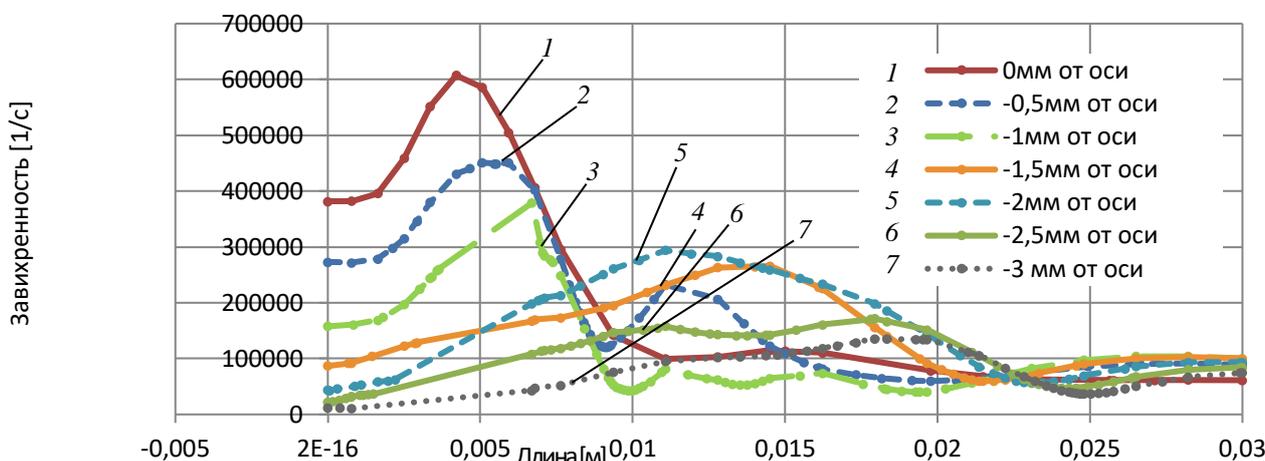


Рис. 7. Распределение завихренности при расчете по линейным траекториям вдоль плазменной струи (рис. 5, а) плазмотрона ПМВР-5.3 (модельный режим «холодной» струи)

Данные расчетов (рис. 8) показывают увеличение на 60 % средних и на 30 % максимальных скоростей в зоне разделочного шва (торец П-образной траектории на удалении 40 см от сопла плазмотрона) при использовании нового плазмотрона ПМВР-5.3 по сравнению с ПМВР-М (при сопоставимых входных параметрах). Кроме того, более чем в 2 раза, возрастает и эффективность газодинамической стабилизации Z, характеризующая рав-

номерность ненормализованного распределения газодинамических характеристик (скорости для данного расчета) в контрольной зоне расчетной траектории. Подобные выводы можно сделать и по результатам расчета на иных участках П-образной траектории, а также при анализе других кинетических параметров струи (удельных расходов и энергий, завихренности и числа Кармана), включая и условия ее нагрева плазменной дугой.

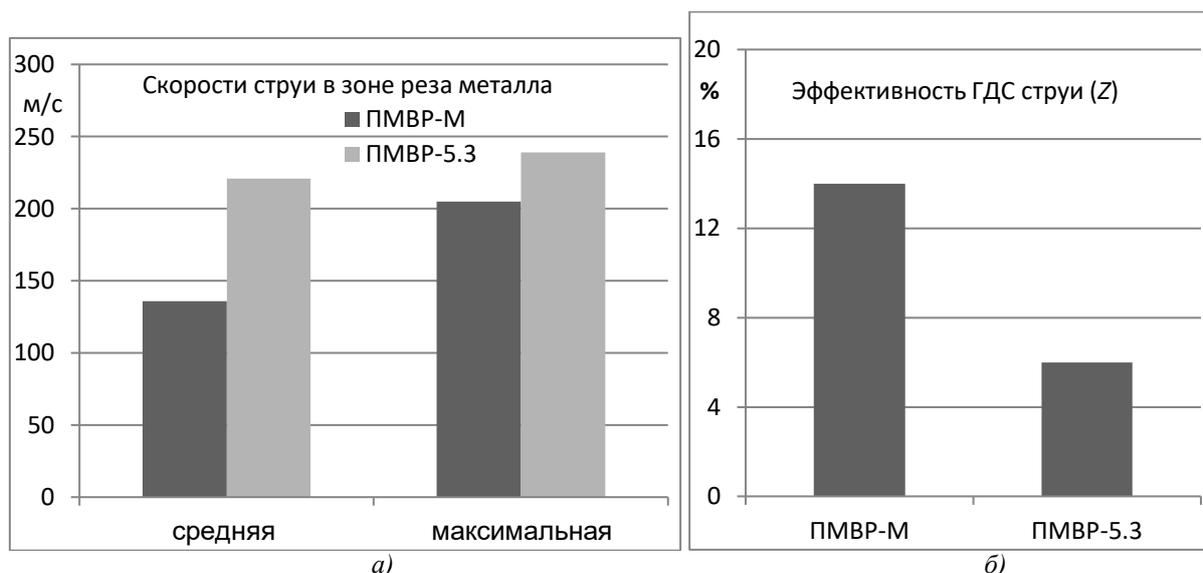


Рис. 8. Сравнительный анализ скоростей (а) и критерия эффективности газодинамической стабилизации Z (б) в зоне воздействия плазменной струи на металл (торец П-образной траектории, «холодная» струя)

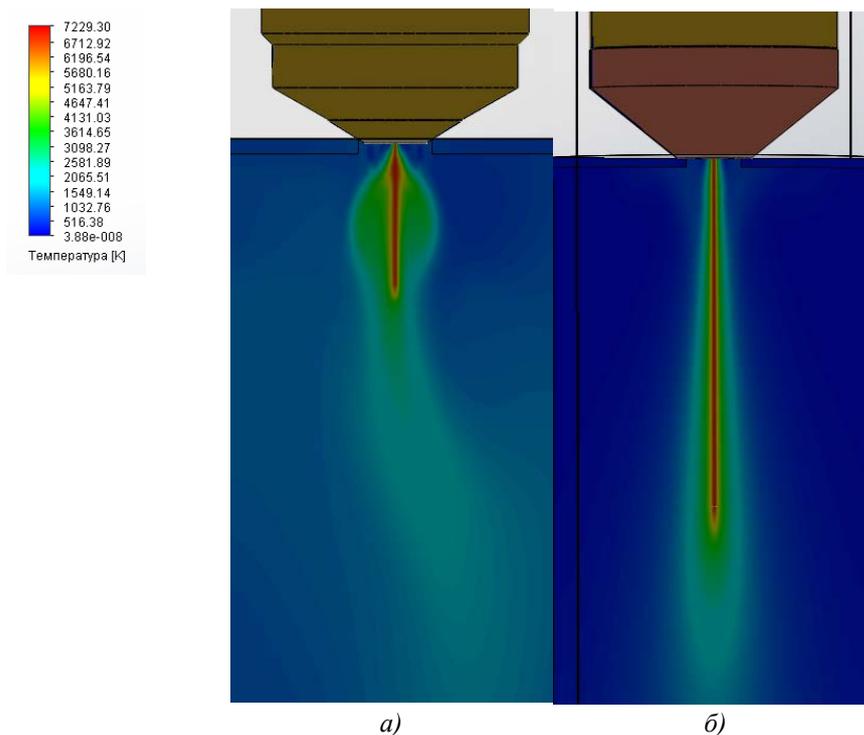


Рис. 9. График распределения температур плазменной дуги (струи), генерируемой плазматронами (по результатам CFD-анализа):

а – плазматрон ПМВР-5.3; б – плазматрон ПМВР-9.1

Полученные с использованием перечисленных критериев эффективности выводы подтверждаются численным и визуальным анализом представленных на рис. 9 распределений температур для плазматронов ПМВР-5.3 и ПМВР-9.1. Среди характерных отличий данных температурных распределений можно выделить:

1) существенную асимметрию распределения температур плазменной струи, генерируемой плазматроном ПМВР-5.3, по сравнению с практически симметричным распределением, достигаемым при работе плазматрона ПМВР-9.1;

2) достижение максимальных температур на удалении в 2...3 см от среза сопла плазматрона ПМВР-5.3 и на торце П-образной траектории (удаление 40 см) при работе плазматрона ПМВР-9.1;

3) более высокие (в 1,5 раза) максимальные температуры, достигаемые в пределах контрольной П-образной траектории при использовании разработанного плазматрона (ПМВР-9.1), чем у базового (ПМВР-5.3);

4) существенное (в 2,5 – 3 раза) превышение максимальных температур, достигаемых на торце П-траектории (в пределах ширины разделочного шва в зоне нижней кромки разрезаемого листа) для плазматрона ПМВР-9.1, чем для ПМВР-5.3.

Заключение

Представленные результаты свидетельствуют о высокой эффективности примененной в плазматроне ПМВР-9.1 системы ГДС, действие которой приводит к формированию более концентрированного (сжатого) и равномерного газоплазменного потока за пределами соплового узла плазматрона, а также к достижению более высоких значений динамических и термокинетических параметров плазменной дуги (струи), позволяющих производить разделку металлов больших толщин с улучшенными характеристиками качества разделочных швов (ширина реза, величина укоса, шероховатость и т.д.). Сочетание высоких значений динамических и термокинетических параметров позволяет также повысить производительность и экономичность разделки металлов. Последний эффект достигается за счет ограничения времени протекания процессов по изменению структурного и фазового состояния металла на прилегающих к кромке реза участках, приводящего к минимизации размеров зоны термического воздействия и возможности исключить дополнительные операции по её последующему механическому удалению при производстве сварных соединений.

Включение рассмотренных в работе процедур и критериев эффективности газовихревой

стабилизации в комплексную методику проектирования плазматронов по газодинамическим и теплофизическим критериям позволит существенно повысить производительность и качество проектной деятельности при разработке новых металлорежущих плазменных технологий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кайдалов, А.А. Современные технологии термической и дистанционной резки конструкционных материалов. – Киев: Экотехнология, 2007. – 456 с.
2. Чередниченко, В.С., Аньшаков, А.С., Кузьмин, М.Г. Плазменные электротехнологические установки. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – 602 с.
3. Жуков, М.Ф., Засыпкин, И.М., Тимошевский, А.Н. и др. Электродуговые генераторы термической плазмы (Низкотемпературная плазма. Т.17). – Новосибирск: Наука, 1999. – 712 с.
4. Анахов, С.В. Принципы и методы проектирования плазматронов. – Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2018. – 165 с.
5. Костылев, А.М. Электродуговые установки (плазматроны). – М.: Изд-во МВТУ им. Н. Э. Баумана, 1969. – 109 с.
6. Жуков, М.Ф., Аньшаков, А.С. Основы расчета плазматронов линейной схемы. – Новосибирск: Ин-т теплотехники СО АН СССР, 1979. – 146 с.
7. Даутов, Г.Ю., Жуков, М.Ф., Коротеев, А.С. и др. Особенности работы генераторов плазмы с вихревой стабилизацией дуги и обобщение результатов исследований // Низкотемпературная плазма. – М.: Мир, 1967. – С. 385-394.
8. Экспериментальные исследования плазматронов / Под ред. М.Ф. Жукова. – Наука, Сибирское отделение, 1977. – 390 с.
9. Еремин, Е.Н., Филиппов, Ю.О. Плазменно-дуговая резка. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2015. – 264 с.
10. Anakhov, S.V., Pykin, Yu.A., Matushkin, A.V. Investigation of systems for gas vortex stabilization of plasma torches // Welding International. – 2016. – Volume 30. – Issue 4. – P. 310-314.
11. Шалимов, М.П., Анахов, С.В., Пыкин, Ю.А., Матушкин, А.В., Матушкина, И.Ю. Оценка эффективности газовых вихревой стабилизации в плазматронах для резки металлов // Сварка и диагностика. – 2018. – № 2. – С. 57-61.
12. Anakhov, S.V., Matushkin, A.V., Pykin, Yu.A. Effect of a gas-vortex stabilization method on the kinematic properties of the jet in metal-cutting plasmatrons // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol.681. – Number 1. DOI:10.1088/1757-899X/681/1/012003.

13. Пат. на изобретение РФ №2754817. Плазматрон. / Ю.А. Пыкин, С.А. Анахов, А.В. Матушкин; заявитель и патентообладатель ООО НПО "Полигон"; заявл. 07.09.2021; опубликовано 24.03.2021.

REFERENCES

1. Kaidalov, A.A. Modern technologies of thermal and remote cutting of structural materials, Kiev: Ekotekhnologiya, 2007, 456 p.
2. Cherednichenko, V.S., Anshakov, A.S., Kuzmin, M.G. Plasma electrotechnological installations. Novosibirsk: NGTU Publ. House, 2011, 602 p.
3. Zhukov, M.F., Zasyupkin, I.M., Timoshevsky, A.N., et. al. Electric-Arc Generators of Thermal Plasma, (Low-temperature plasma. Vol.17), Novosibirsk: Nauka, 1999, 712 p.
4. Anakhov, S.V. Principles and methods of designing plasma torches. Ekaterinburg: Izdatel'stvo Rossiiskogo gos. prof.-ped. universiteta, 2018, 165 p.
5. Kostylev, A.M. Electric arc installations (plasma torches). M.: Publ. House of the Bauman Moscow State Technical University, 1969, 109 p.
6. Zhukov, M.F., Anshakov, A.S. The basis of the calculation of the linear plasma torches schema. Novosibirsk: ITP SB AS USSR, 1979, 146 p.
7. Dautov, G.Yu., Zhukov, M.F., Koroteev, A.C., et.al. Features of plasma generators with vortex arc stabilization and generalization of research results. Low temperature plasma, Moscow: Mir, 1967, pp. 385-394.
8. Experimental researches of plasma torches / Edited by M.F. Zhukov. Nauka, Sibirskoe otделение, 1977, 390 p.
9. Eremine, E.N., Filippov, Yu.O. Plasma arc cutting. Omsk: OMSTU Publ. house, 2015, 264 p.
10. Anakhov, S.V., Pykin, Yu.A., Matushkin, A.V. Investigation of systems for gas vortex stabilization of plasma torches. / Welding International, 2016, Vol.30, Issue 4, pp. 310-314.
11. Shalimov, M.P., Anakhov, S.V., Pykin, Yu.A., Matushkin, A.V., Matushkina, I.Yu. Evaluation of the effectiveness of gas-vortex stabilization in plasma torches for cutting metals. / Welding and diagnostics, 2018, No. 2, pp. 57-61.
12. Anakhov, S.V., Matushkin, A.V., Pykin, Yu.A. Effect of a gas-vortex stabilization method on the kinematic properties of the jet in metal-cutting plasmatrons. / IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2019, Vol.681, Number 1. DOI:10.1088/1757-899X/681/1/012003.
13. Patent for the invention of the Russian Federation No. 2754817. Plasmatron. / Yu.A. Pykin, S.A. Anakhov, A.V. Matushkin; applicant and patent holder of NPO Polygon LLC; application 07.09.2021; published 03/24/2021.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 05.11.2021; одобрена после рецензирования 22.11.2021; принята к публикации 10.12.2021.

The article was submitted 05.11.2021; approved after reviewing 22.11.2021; accepted for publication 10.12.2021.