

Анахов С.В., Пыкин Ю.А., Матушкин А.В. Новые способы повышения термокинетических свойств металлорежущих плазматронов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2019. – Т. 21, № 3. – С. 76–84. DOI: 10.15593/2224-9877/2019.3.09

Anakhov S.V., Pykin Yu.A., Matushkin A.V. New technique to improve the thermo-kinetic properties of metal-cutting plasmotrons. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2019, vol. 21, no. 3, pp. 76–84. DOI: 10.15593/2224-9877/2019.3.09

**ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 21, № 3, 2019**

Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science

<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9877/2019.3.09

УДК 620.18:621.791

С.В. Анахов¹, Ю.А. Пыкин², А.В. Матушкин³

¹ Российский государственный профессионально-педагогический университет, Екатеринбург, Россия

² Уральский государственный лесотехнический университет, Екатеринбург, Россия

³ Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

**НОВЫЕ СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ТЕРМОКИНЕТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ ПЛАЗМОТРОНОВ**

В соответствии с основными критериями эффективности плазменных технологий резки металлов – производительностью, качеством реза и надежностью работы оборудования – поставлены задачи исследования данной работы. Они заключаются в поисках новых проектных решений, позволяющих повысить эффективность плазменной резки металлов. Поскольку основным фактором проектирования является обеспечение газодинамической работы плазматрона, в работе основное внимание обращено на поиск новых конструктивных способов газодинамической стабилизации плазменной дуги. Исследованы различные способы газовихревой стабилизации в плазматронах для резки металлов. Исследованы одно- и двухпоточные плазматроны с различными конструкциями завихрителей. Показано влияние угла ввода плазмообразующего газа на кинематические характеристики плазменной струи. Увеличение радиальной составляющей скорости на выходе из завихрителя позволяет увеличить равномерность распределения скоростей и кинетические свойства струи в зоне воздействия на разрезаемый металл, что, в свою очередь, повышает качество и производительность резки. В результате применения модернизированного завихрителя максимальная скорость резки увеличилась на 25 %. При резке тонколистовых металлов целесообразно использовать технологию узкоструйной плазмы. Данная технология построена на разделении потока плазмообразующего газа на два – плазмообразующий и стабилизирующий – с раздельной подачей газа в сопловой узел для дополнительного обжатия плазменной дуги на выходе из основного сопла плазматрона. В результате струя такого двухпоточного плазматрона обладает более высокими кинетическими свойствами (имеет более высокие максимальные скорости), чем струя однопоточного плазматрона, однако сохраняет свои свойства на более коротком расстоянии.

Ключевые слова: плазматрон, проектирование, газодинамика, скорость, газоводушный тракт, профилирование, газовихревая стабилизация, завихритель, расширительная камера, плазмообразующий газ, плазменная струя, численное моделирование.

S.V. Anakhov¹, Yu.A. Pykin², A.V. Matushkin³

¹ Russian State Vocational-Professional University, Ekaterinburg, Russian Federation

² Ural State Forest Engineering University, Ekaterinburg, Russian Federation

³ Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Eltsin, Ekaterinburg, Russian Federation

**NEW TECHNIQUE TO IMPROVE THE THERMO-KINETIC PROPERTIES
OF METAL-CUTTING PLASMATRONS**

In accordance with the main criteria of efficiency for plasma metal cutting technologies - productivity, cutting quality and reliability of the equipment - the tasks of the study are set. They are in search of new design solutions to improve the efficiency of plasma cutting of metals. Since the main design factor is to ensure the gas-dynamic operation of the plasma torch, the main attention is paid to the search for new constructive ways of gas-dynamic stabilization of the plasma arc. Various methods of gas-vortex stabilization in plasma torches for metal cutting are investigated. Single- and double-flow plasma torches with different swirler designs were investigated. The influence of the angle of entry of the plasma-forming gas on the kinematic characteristics of the plasma jet is shown. The increase in the radial component of the velocity at the output from the swirler allows to increase the uniformity of the velocity distribution and the kinetic properties of the jet in the zone of influence on the cut metal, which in turn increases the quality and productivity of cutting. As a result of the use of the upgraded swirler, the maximum cutting speed increased by 25%. When cutting sheet metals it is advisable to use the technology of "narrow-jet plasma". This technology is based on the separation of the plasma-forming gas flow into two – plasma-forming and stabilizing – with separate gas supply to the nozzle unit for additional compression of the plasma arc at the outlet of the main nozzle of the plasma torch. At the result a jet of double-flow plasma torch has a higher kinetic properties (has a higher top speed) than a jet of the single-flow plasma torch, however, retains its properties over a short distance.

Keywords: plasmatron, designing, flow dynamics, velocity, air-gas path, profiling, gas rotating stabilization, swirl canals, expansion chamber, plasma gas, plasma jet, computational modeling.

Обширность применения плазменных устройств ставит задачу проектирования плазмотронов, специфичных для каждой технологии [1–3]. Современные плазмотроны способны работать на мощностях энергопотребления от единиц до сотен мегаватт [4, 5], обеспечивая (с разным термическим коэффициентом полезного действия) преобразование электрической энергии в тепловую и кинетическую и производя тем самым термокинетическое воздействие на обрабатываемые материалы [6, 7]. Обеспечение эффективности подобного воздействия в соответствии с заданными параметрами качества – главный критерий выбора потребителем соответствующего устройства или технологии [8], а следовательно, и результативности их проектирования [9].

При проектировании плазмотронов для воздушно-плазменной резки металлов [10] в качестве основных критериев эффективности, как правило, выбираются производительность, качество реза и надежность работы плазменного оборудования [11]. Высокие значения этих показателей зависят в первую очередь от эффективности системы газодинамической стабилизации [12, 13], определяющей высокую степень тепловложения и кинетические свойства плазменной дуги (струи), надежность работы катодного и соплового узлов плазмотрона [14]. В современных плазмотронах для резки металлов, как правило, применяется газовихревой способ стабилизации с тангенциальной подачей плазмообразующего газа (ПОГ) в сопловую узел и дополнительным обжатием плазменной дуги (струи) как самим соплом, так и на выходе из сопла вихревым потоком стабилизирующего газа (в технологии узкоструйной плазмы) [15, 16]. Тангенциально закрученный поток газа формируется в вихревых камерах (завихрителях), количество, конструкция и расположение которых в плазмотроне существенным образом определяет эффективность резки металлов [17].

Проведенные ранее авторами исследования [18] показали, что известный способ газовихревой стабилизации с применением однопоточной схемы подачи ПОГ в сопловую узел через единственный завихритель не обеспечивает равномерность распределения газового потока по сечению газоздушного тракта (ГВТ) и в сопловом канале плазмотрона. Данная проблема возникает из-за асимметрии подачи газа в расширительную камеру, расположенную перед завихрителем, и ограниченных размеров самой камеры. Для повышения коэффициента равномерности распределения газового потока можно увеличить размеры камеры или использовать систему газодинамических фильтров в виде дополнительных препятствий в расшири-

тельной камере [19]. Однако при этом возрастает трудоемкость изготовления и стоимость плазмотрона. В этой связи следует исследовать и другие возможности конструктивного улучшения системы газовихревой стабилизации металлорежущих плазмотронов.

В качестве моделей для исследования были взяты два разработанных в авторском коллективе плазмотрона для резки металлов производства ООО НПО «Полигон» (г. Екатеринбург) (рис. 1):

- ПМВР-5.3 – из серии однопоточных плазмотронов ПМВР-5 [20] со встроенным ступенчатым газодинамическим фильтром повышенной производительности для работы на токах до 200 А;
- ПМВР-9.1 – из серии двухпоточных плазмотронов ПМВР-9 со встроенным газодинамическим фильтром и системой двойного обжатия плазменной дуги (технология узкоструйной плазмы) [21].

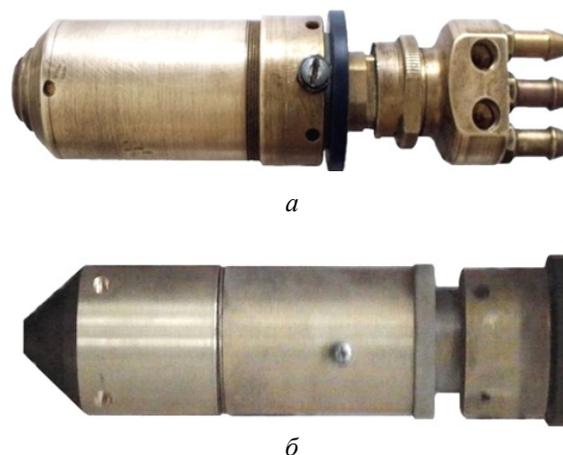


Рис. 1. Плазмотроны: а – ПМВР-5.3; б – ПМВР-9.1

Конструкция ГВТ плазмотрона ПМВР-5.3 построена по принципу ступенчатого выравнивания скорости потока ПОГ по сечению канала (т.е. газ поступает из одного канала в два, потом из двух в четыре и т.д.). Заключительным звеном в данной цепочке является основной завихритель. В конструкции плазмотрона применены серийно выпускаемые катод А-141 и серия сопел к А-141 с выходным отверстием диаметром от 1,4 до 1,9 мм. Изначально при испытаниях плазмотрона был применен серийный завихритель, устанавливаемый на катод А-141 (рис. 2, а). Особенность конструкции данного завихрителя такова, что поток ПОГ, проходя через него, подается по касательной относительно поверхности катода в плоскости, перпендикулярной катоду. Таким образом, поток ПОГ на выходе из данного завихрителя имеет только радиальную составляющую скорости потока. На втором этапе испытаний конструкции плазмотрона вместо

серийного завихрителя был использован модернизированный завихритель (рис. 2, б). Отличительной особенностью нового завихрителя стало изменение количества отверстий в соответствии с описанным выше принципом и добавление наклона отверстий по отношению к оси плазмотрона. Поток ПОГ на выходе из такого завихрителя обладал не только радиальной, но и осевой составляющей скорости потока.

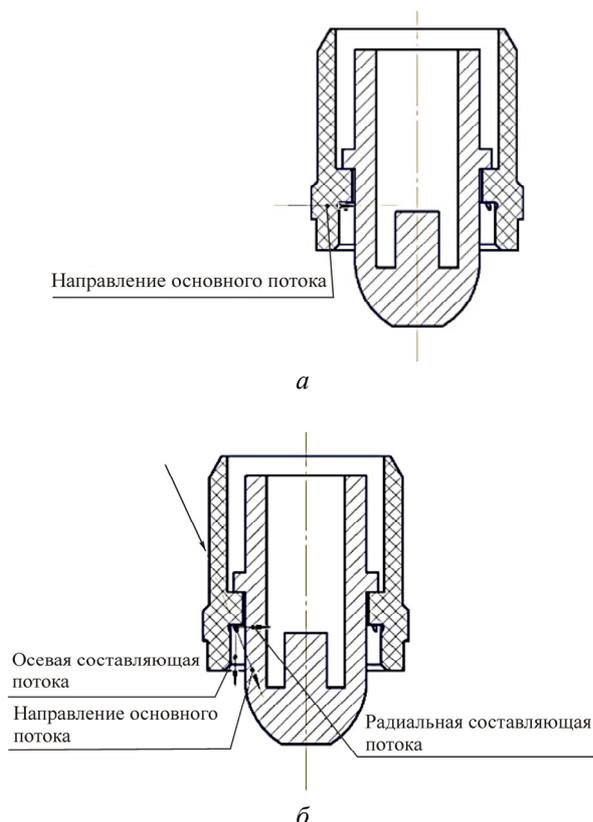


Рис. 2. Завихрители для плазмотрона ПМБР-5.3: а – серийный; б – модернизированный

Конструкция плазмотрона ПМБР-9.1 построена на разделении потока ПОГ на два – плазмообразующий и стабилизирующий – с отдельной подачей газа в сопловой узел. При этом сформированная в основном вихревом плазмообразующем потоке плазменная дуга дополнительно обжимается (стабилизируется) за счет дополнительно закрученного вторичного газа на выходе из основного сопла плазмотрона (рис. 3).

Для оценки влияния различных способов газовихревой стабилизации на эффективность работы плазмотронов были проведены расчеты кинематических свойств (локальной скорости) плазменной струи. Исследования были основаны на моделировании течения потока газа по каналам плазмотрона и в области его истечения, выполненном в среде SolidWorks в приложении Flow

simulation [22, 23]. В качестве исходных данных были использованы паспортные данные плазмотронов подобного типа по массовому расходу газа (общепотребимое значение – 0,011 кг/с). На выходе из сопла плазмотрона использовались параметры окружающей среды с нормальным атмосферным давлением. В целях абстрагирования от термодинамических эффектов расчет производился на холодной струе газа в пренебрежении нагревом плазменной дугой и теплообменом между потоком ПОГ и стенками каналов ГВТ плазмотрона. Расчет параметров скорости производился на разном удалении от оси соплового канала и среза катода плазмотрона по параллельным оси линиям, в пределах цилиндрической области, ограниченной диаметром соплового канала (рис. 4).

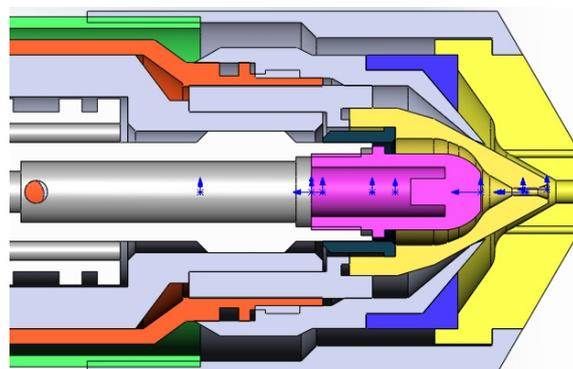


Рис. 3. Схема ГВТ плазмотрона ПМБР-9.1

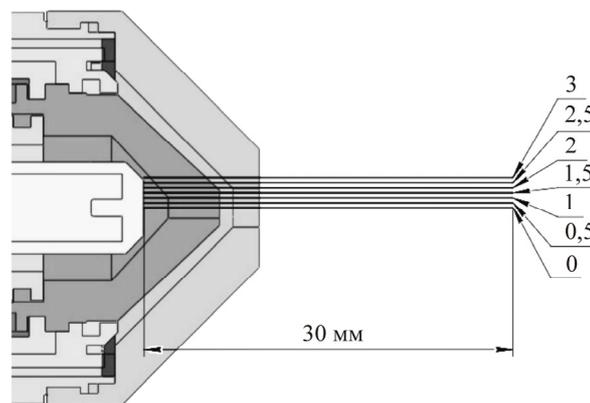


Рис. 4. Расчетная схема определения кинематических характеристик струи плазмотрона ПМБР-5.3

Для анализа распределения скоростей газового потока V были использованы три статистических параметра:

1. Размах вариации $R = V_{\max} - V_{\min}$.
2. Отношение вариации $L = V_{\max}/V_{\min}$.
3. Коэффициент вариации $F = S/(\bar{V})$, где

S – дисперсия V , \bar{V} – средняя скорость.

Совокупность данных параметров позволяет сравнивать характеристики потоков как с точки зрения кинетических свойств струи, так и с учетом равномерности распределения скоростей в сечении газового потока.

Результаты расчетов скоростей в исследуемом режиме подачи ПОГ для различных способов газодинамической стабилизации в одно- и двухпоточных плазмотронах представлены на рис. 5. Анализ представленных изображений позволяет сделать вывод об имеющихся различиях в распределении скоростей, определяющем форму, протяженность, кинематические и энергетические параметры плазменной струи.

На рис. 6–8 показаны результаты расчета значений скорости, выполненные в соответствии со схемой, представленной на рис. 4 (для верхней осесимметричной части расчетной области).

Следует обратить внимание на геометрию соплового узла, определяющую расстояние от плоскости катода до среза сопла величиной порядка 7 мм.

Анализ представленных на рис. 6 и 7 распределений значений скорости позволяет сделать вывод о влиянии примененного в плазмотроне ПМВР-5.3 нового завихрителя на кинематические свойства струи. Имеющаяся на срезе сопла неравномерность распределения скоростей по сечению канала по мере удаления от плоскости истечения струи становится существенно менее выраженной. При этом на максимальном расчетном удалении в струе плазмотрона ПМВР-5.3 с новым завихрителем наблюдается меньший разброс значений скорости при сопоставимых максимальных и более высоком значении средних по сечению показателей по сравнению со струей, формируемой плазмотроном ПМВР-5.3 с серийным завихрителем. Фактически это свидетельствует о сохранении более высоких энергетических свойств на более значительном диапазоне длины плазменной струи, что, в свою очередь, должно положительно повлиять на вольт-амперные характеристики дуги и ее способность к резке металла большей толщины с повышенной скоростью.

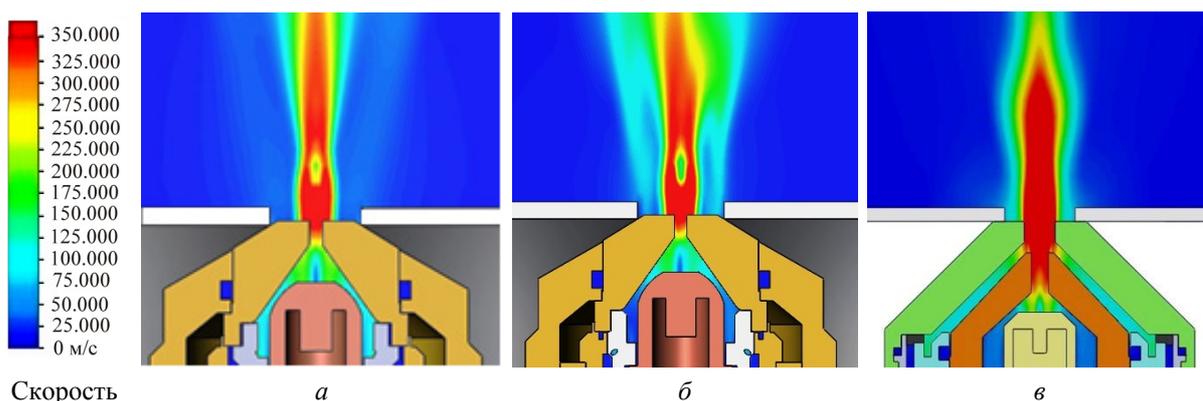


Рис. 5. Распределение скоростей в плазменной струе плазмотронов: а – ПМВР-5.3 с серийным завихрителем; б – ПМВР-5.3 с новым завихрителем; в – ПМВР-9.1 (двойное сопло)

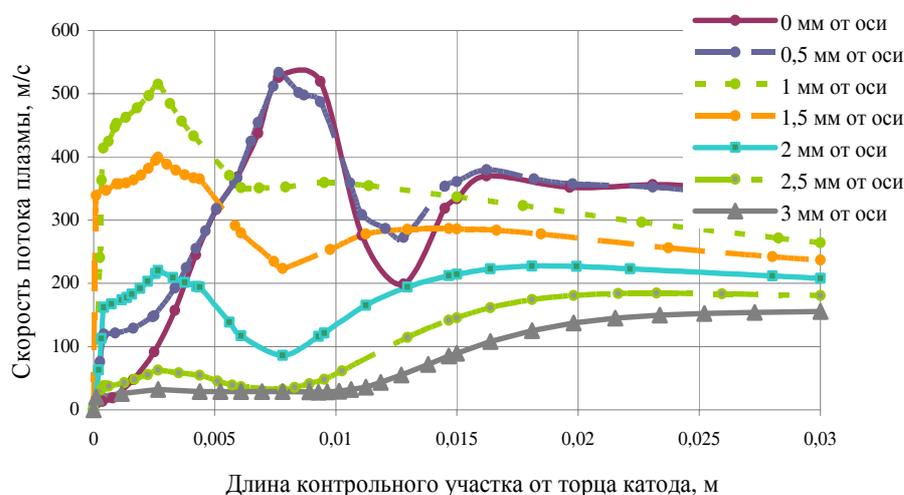


Рис. 6. Распределение скоростей в струе плазмотрона ПМВР-5.3 с серийным завихрителем

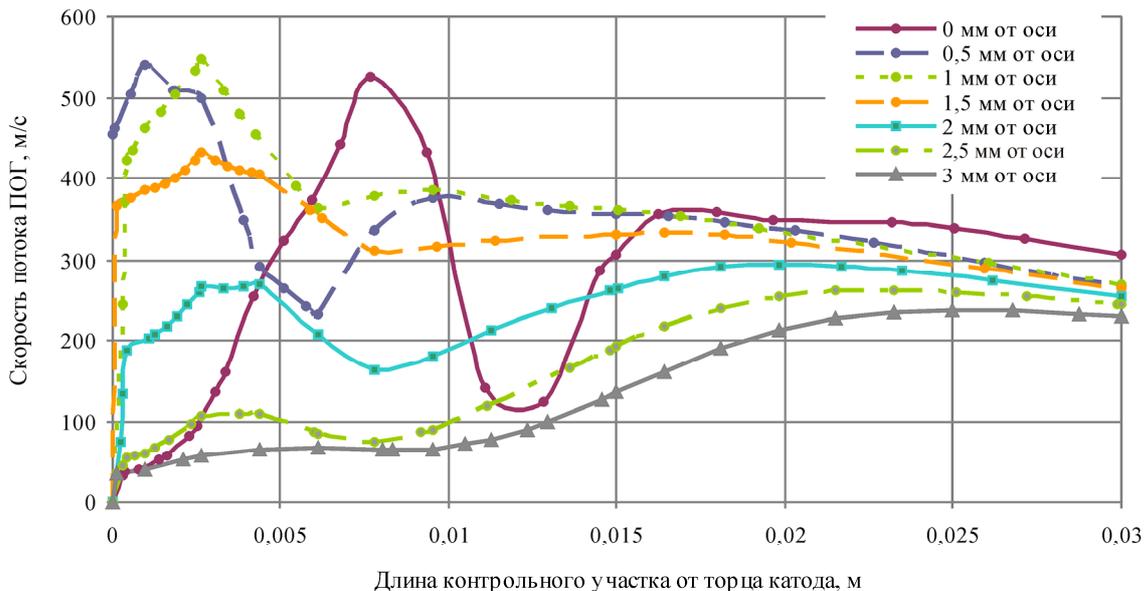


Рис. 7. Распределение скоростей в струе плазмотрона ПМВР-5.3 с новым завихрителем

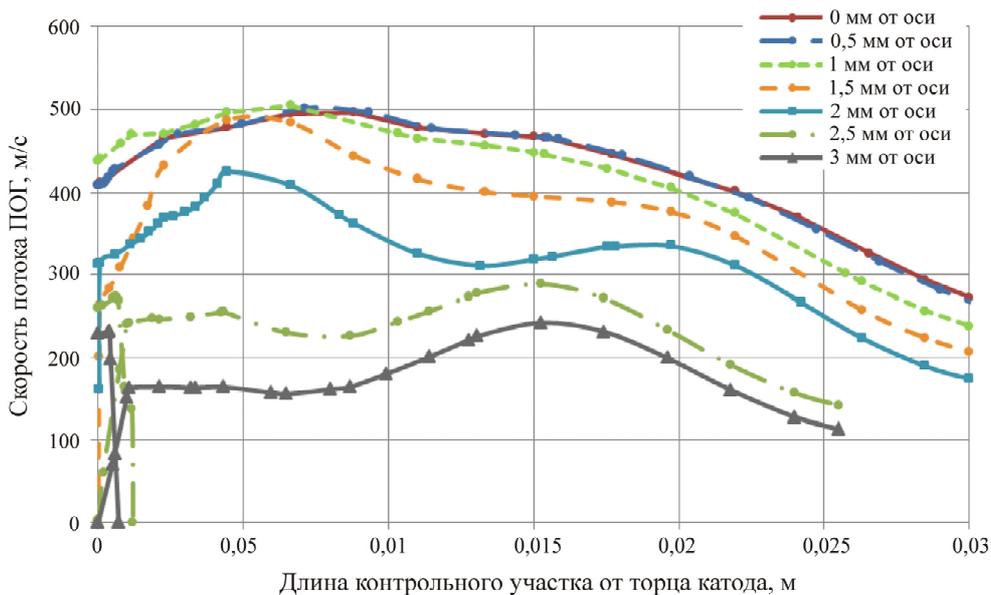
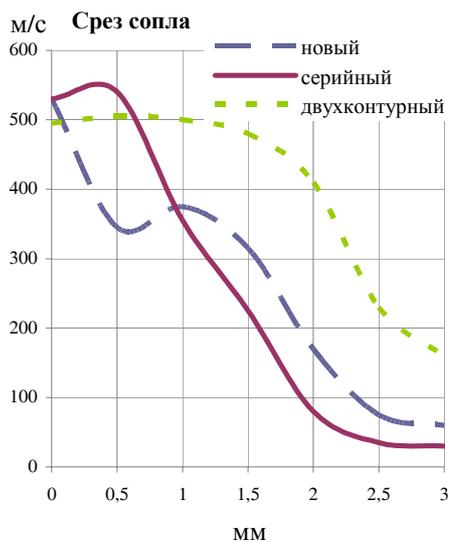


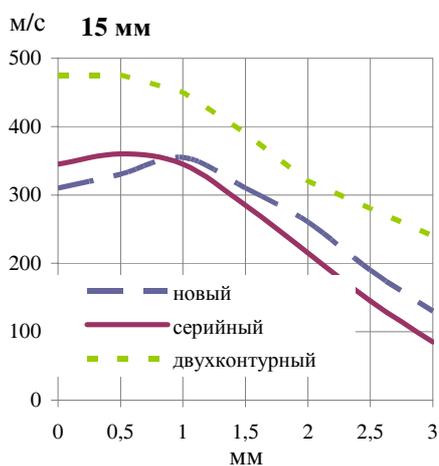
Рис. 8. Распределение скоростей в струе плазмотрона ПМВР-9.1

Данные расчетов для двухпоточного плазмотрона ПМВР-9.1, представленные на рис. 8, свидетельствуют о существенно более равномерном распределении скоростей в потоке струи, как в плоскости истечения, так и на удалении от нее. При этом, однако, очевидно, что кинематические и энергетические свойства струи, определяемые максимальными и средними значениями скорости, сохраняются на более коротком (менее 25 мм) расстоянии, чем в струях, генерируемых однопоточным плазмотроном

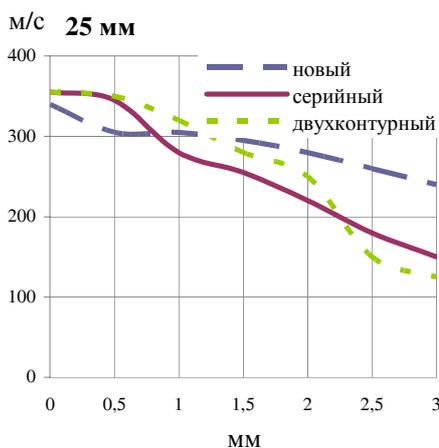
ПМВР-5.3. Об этом же свидетельствуют сравнительные графики, представленные на рис. 9. Последний фактор определяет не только технологические условия резки данным плазмотроном, но и влияет на акустические свойства струи. Как известно [24], размер акустического ядра струи с максимальными скоростями определяет уровень шумоизлучения, поэтому снижение его протяженности должно иметь положительный эффект с точки зрения акустической безопасности данной технологии.



а

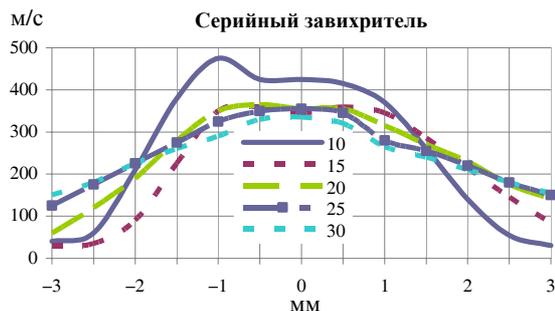


б

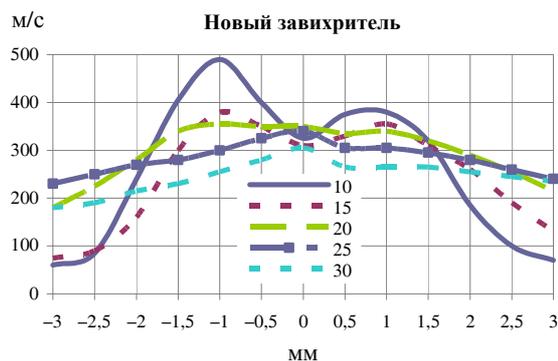


в

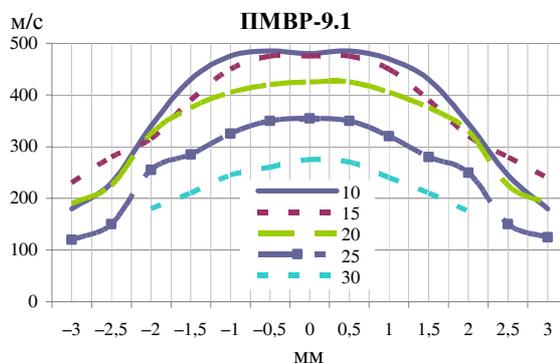
Рис. 9. Распределение скоростей по сечению струй (расчетная схема – см. рис. 4) в зависимости от удаления от среза сопла плазмотронов (ПМВР-5.3 с серийным и новым завихрителями и двухконтурного ПМВР-9.1)



а



б



в

Рис. 10. Распределение скоростей в струе (полное расчетное сечение) в зависимости от удаления от среза сопла плазмотронов (ПМВР-5.3 с серийным и новым завихрителями и двухконтурного ПМВР-9.1)

На рис. 10 показаны распределения скоростей по всему расчетному сечению струи, которые в целом подтверждают сделанные ранее выводы. Применение дополнительного обжатия основного плазмообразующего потока в плазмотроне ПМВР-9.1 позволяет существенно снизить характерные для плазмотрона ПМВР-5.3 неоднородности распределения скоростей, возникающие на срезе сопла из-за срыва резко расширяющегося потока. Кроме того, струя плазмотрона ПМВР-9.1 обладает более

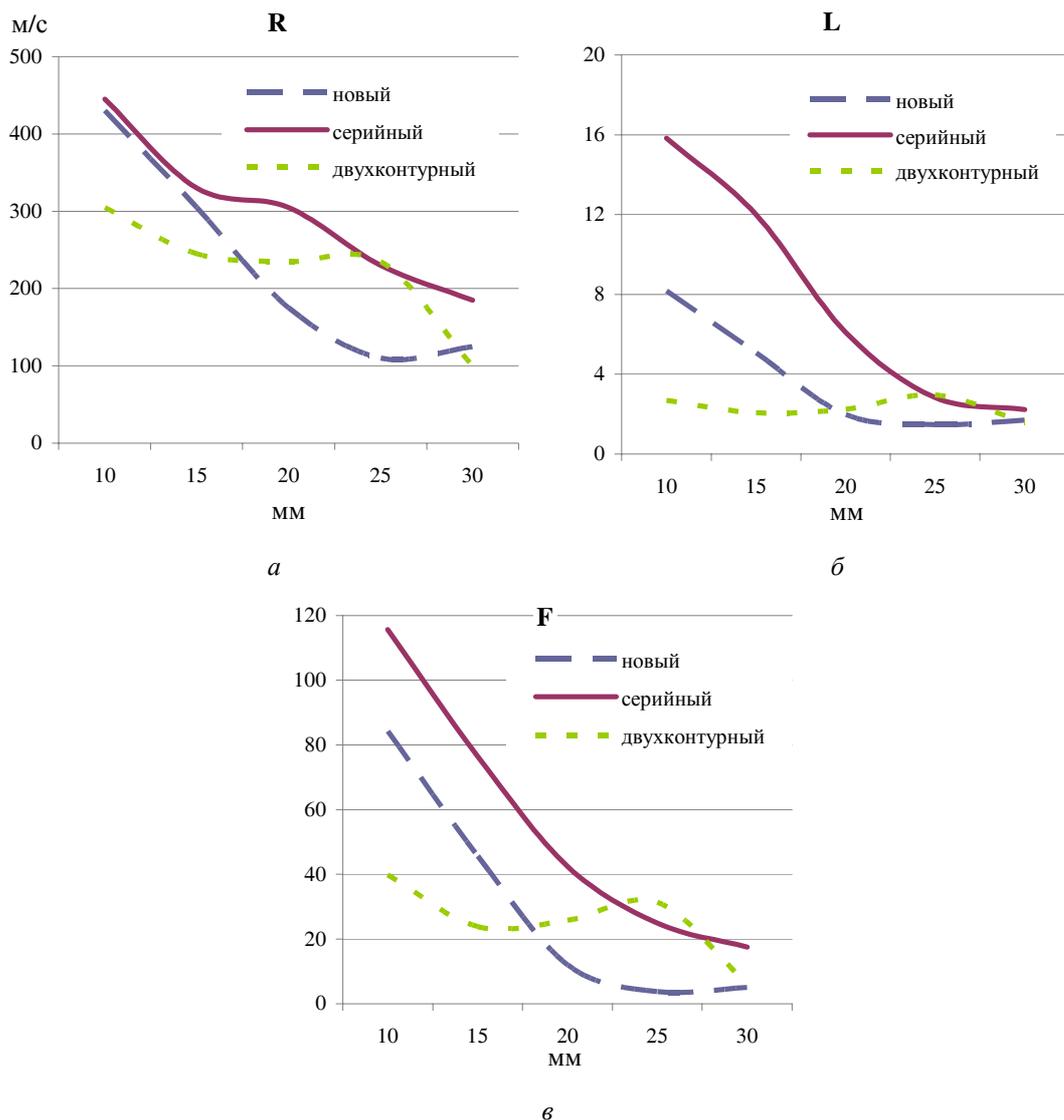


Рис. 11. Статистические распределения кинематических характеристик в зависимости от удаления от среза сопла плазматронов (ПМВР-5.3 с серийным и новым завихрителями и двухконтурного ПМВР-9.1)

высокими кинетическими свойствами (имеет более высокие максимальные скорости), чем струя плазматрона ПМВР-5.3. Однако подобные преимущества наблюдаются лишь в пределах удаления на 15–20 мм от среза катода. На больших расстояниях наиболее высокие показатели равномерности распределения и кинетических свойств имеет плазматрон ПМВР-5.3 с новым завихрителем, что подтверждается графиками статистических распределений кинематических характеристик, представленных на рис. 11. Рост данных показателей, в свою очередь, должен сказаться на увеличении производительности и улучшении качества резки.

Последний вывод подтверждается данными, полученными в процессе резки плазматроном ПМВР-5.3. При резке пластины из стали 09Г2С толщиной 10 мм на токе в 90 А максимальная скорость резки была не более 1,1–1,2 м/мин. В резуль-

тате применения модернизированного завихрителя максимальная скорость резки увеличилась до 1,5–1,6 м/мин.

Представленные результаты показывают, что угол ввода ПОГ в сопловой узел влияет на кинематические и кинетические свойства плазменной струи, а следовательно, на параметры резки. Это дает основание провести дальнейшие исследования по определению оптимального угла ввода ПОГ и его влиянию на производительность, качество резки и надежность работы плазматрона. При резке тонколистовых металлов предпочтительнее использовать технологию узкоструйной плазмы [25].

Работа выполнена при финансовой поддержке госзадания Министерства высшего образования и науки № 13.10317.2018/11.12.

Список литературы

1. Чередниченко В.С., Аньшаков А.С., Кузьмин М.Г. Плазменные электротехнологические установки. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – 602 с.
2. Электродуговые генераторы термической плазмы (Низкотемпературная плазма) / М.Ф. Жуков, И.М. Засыпкин, А.Н. Тимошевский [и др.]. – Новосибирск: Наука, 1999. – Т. 17. – 712 с.
3. Клименко А.А., Ляпин Г.К. Конструкции электродуговых плазматронов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 56 с.
4. Многофазные электродуговые плазматроны переменного тока для плазменных технологий / Ф.Г. Рутберг, А.А. Сафронов, С.Д. Попов [и др.] // ТВТ. – 2006. – Т. 44, № 2. – С. 205–211.
5. Рутберг Ф.Г., Глебов И.А. Мощные генераторы плазмы. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 153 с.
6. Дресвин С.В., Зверев С.Г. Плазматроны: конструкции, параметры, технологии. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – 208 с.
7. Волокитин Г.Г., Лысак И.А., Аньшаков А.С. Плазменная обработка материалов / Том. гос. архит.-строит. ун-т. – Томск, 2009. – 200 с.
8. Matushkina I.Yu., Anakhov S.V., Pykin Yu.A. Evaluation of the effectiveness of plasma torches design for metal cutting by quali-metric method // Material Sci. Forum. – 2019. – Vol. 946. – P. 877–882.
9. Анахов С.В. Принципы и методы проектирования плазматронов. – Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2018. – 165 с.
10. Кайдалов А.А. Современные технологии термической и дистанционной резки конструкционных материалов. – Киев: Экотехнология, 2007. – 456 с.
11. Лашенко Г.И. Плазменная резка металлов и сплавов. – Киев: Экотехнология, 2003. – 64 с.
12. Коротеев А.С., Миронов В.М., Свирчук Ю.С. Плазматроны. Конструкции, характеристики, расчет. – М.: Машиностроение, 1993. – 296 с.
13. Жуков М.Ф., Аньшаков А.С. Основы расчета плазматронов линейной схемы / Ин-т теплофизики СО АН СССР. – Новосибирск, 1979. – 146 с.
14. Донской А.В., Клубникин В.С. Электроплазменные процессы и установки в машиностроении. – Л.: Машиностроение, 1979. – 221 с.
15. Анахов С.В., Пыкин Ю.А. Плазматроны: проблема акустической безопасности. Теплофизические и газодинамические принципы проектирования маломощных плазматронов / Ред.-изд. отдел УрО РАН. – Екатеринбург, 2012. – 224 с.
16. Чику Куанг Фи. Исследование эффективности технологии узкоструйной плазменной резки металлов: дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2008. – 143 с.
17. Оценка эффективности газовой стабилизации в плазматронах для резки металлов / М.П. Шалимов, С.В. Анахов, Ю.А. Пыкин, А.В. Матушкин, И.Ю. Матушкина // Сварка и диагностика. – 2018. – № 2. – С. 57–61.
18. Анахов С.В., Пыкин Ю.А., Матушкин А.В. Исследование систем газовой стабилизации плаз-

тროнов // Сварочное производство. – 2015. – № 4. – С. 20–24.

19. Анахов С.В., Пыкин Ю.А., Матушкин А.В. Газовихревая стабилизация в плазматронах: новые решения // Сварочное производство. – 2015. – № 5. – С. 49–53.

20. Плазматрон: пат. 2584367 / Пыкин Ю.А., Анахов С.В., Матушкин А.В. – NRU2015108603/02A; заявл. 11.03.2015; опубл. 20.05.2016, Бюл. № 14.

21. About raising of the gas vortex stabilization efficiency in plasma torch for metal cut-ting / A.V. Matushkin, Yu.A. Pykin, S.V. Anakhov, I.Y. Matushkina // Solid State Phenomena. – 2018. – Vol. 284. – P. 218–223.

22. Анахов С.В., Пыкин Ю.А., Матушкин А.В. Методические основы автоматизированного газодинамического проектирования в электроплазменных технологиях // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение. Материаловедение. – 2018. – Т. 20, № 1. – С. 62–70.

23. Анахов С.В., Пыкин Ю.А., Матушкин А.В. Методики расчета и проектирования плазматронов для резки металлов // Сварочное производство. – 2018. – № 7. – С. 19–24.

24. Кузнецов В.М. Основы теории шума турбулентных струй. – М.: Физматлит, 2008. – 240 с.

25. Anakhov S.V., Pykin Yu.A., Matushkin A.V. Narrow jet plasma as the energy efficient and safe technology for metal cutting // Solid State Phenomena (Material Sci. Forum). – 2016. – Vol. 870. – P. 523–527.

References

1. Cherednichenko V.S., An'shakov A.S., Kuz'min M.G. Plazmennyye elektrotekhnologicheskyye ustanovki [Plasma Electrical Installations]. Novosibirsk: Izdatel'stvo NGTU, 2011, 602 p.
2. Zhukov M.F., Zasypkin I.M., Timoshevskii A.N. Elektrodugovyye generatory termicheskoi plazmy (Nizkotemperaturnaia plazma) [Electric arc generators of thermal plasma (low-temperature plasma)]. Novosibirsk: Nauka, 1999, vol. 17, 712 p.
3. Klimentko A.A., Liapin G.K. Konstruktsii elektrodugovykh plazmotronov [Structures electric arc plasma torches]. Moscow: Izdatel'stvo MGTU imeni N.E. Bauman, 2010, 56 p.
4. Rutberg F.G., Safronov A.A., Popov S.D. Mnogofaznyye elektrodugovyye plazmotrony peremennogo toka dlia plazmennykh tekhnologii [Multiphase AC electric arc plasma torches for plasma technology]. TVT, 2006, vol. 44, no. 2, pp. 205–211.
5. Rutberg F.G., Glebov I.A. Moshchnyye generatory plazmy [Powerful plasma generators]. Moscow: Energoatomizdat, 1985, 153 p.
6. Dresvin S.V., Zverev S.G. Plazmotrony: konstruktsii, parametry, tekhnologii [Plasma torches: structures, parameters, technologies]. Saint-Petersburg: Izdatel'stvo Politekhn. univversiteta, 2007, 208 p.
7. Volokitin G.G., Lysak I.A., An'shakov A.S. Plazmennaya obrabotka materialov [Plasma material processing]. Tomskii gosudsrstvennyi arkhiv.-stroit. universitet, 2009, 200 p.

8. Matushkina I.Yu., Anakhov S.V., Pykin Yu.A. Evaluation of the effectiveness of plasma torches design for metal cutting by quali-metric method. *Material Sci. Forum*, 2019, vol. 946, pp. 877–882.
9. Anakhov S.V. Printsipy i metody proektirovaniia plazmotronov [Principles and methods of designing plasma torches]. Ekaterinburg: Izdatel'stvo Rossiiskogo gos. prof.-ped. universiteta, 2018, 165 p.
10. Kaidalov A.A. Sovremennye tekhnologii termicheskoi i distantsionnoi rezki konstruksionnykh materialov [Modern technologies of thermal and remote cutting of structural materials]. Kiev: Ekotekhnologiya, 2007, 456 p.
11. Lashchenko G.I. Plazmennaiia rezka metallov i spлавov [Plasma cutting of metals and alloys]. Kiev: Ekotekhnologiya, 2003, 64 p.
12. Koroteev A.C., Mironov V.M., Svirchuk Iu.S. Plazmotrony. Konstruktsii, kharakteristiki, raschet [Plasmotrons. Structures, characteristics, calculation]. Moscow: Mashinostroenie, 1993, 296 p.
13. Zhukov M.F., An'shakov A.S. Osnovy rascheta plazmotronov lineinoi skhemy [Basics of linear scheme plasma torch calculation]. Iniversitet teplofiziki SO AN SSSR. Novosibirsk, 1979, 146 p.
14. Donskoi A.V., Klubnikin V.S. Elektrolazmennye protsessy i ustanovki v mashinostroenii [Electroplasma processes and installations in mechanical engineering]. Lenigrad: Mashinostroenie, 1979, 221 p.
15. Anakhov S.V., Pykin Iu.A. Plazmotrony: problema akusticheskoi bezopasnosti. Teplofizicheskie i gazodinamicheskie printsipy proektirovaniia maloshumnykh plazmotronov [Plasma torches: acoustic safety problem. Thermophysical and gas-dynamic principles of designing low-noise plasmatrons]. Red.-izd. otdel UrO RAN, Ekaterinburg, 2012, 224 p.
16. Chieu Kuang Fi. Issledovanie effektivnosti tekhnologii uzkostruinoi plazmennoi rezki metallov [Investigation of the efficiency of narrow jet plasma technology for metal cutting] PhD. thesises. Saint-Petersburg, 2008, 143 p.
17. Shalimov M.P., Anakhov S.V., Pykin Iu.A., Matushkin A.V., Matushkina I.Iu. Otsenka effektivnosti gazovikhrevoi stabili-zatsii v plazmotronakh dlia rezki metallov [Estimation of efficiency of gas vortex stabilization in metal cutting plasma torches]. Svarka i diagnostika, 2018, no. 2, pp. 57-61.
18. Anakhov S.V., Pykin Iu.A., Matushkin A.V. Issledovanie sistem gazovikhrevoi stabilizatsii plazmotronov [Investigation of gas vortex stabilization systems of plasmatrons]. *Svarchnoe proizvodstvo*, 2015, no. 4, pp. 20-24.
19. Anakhov S.V., Pykin Iu.A., Matushkin A.V. Gazovikhrevaia stabilizatsiia v plazmotronakh: novye resheniia [Gas vortex stabilization in plasma torches: new solutions]. *Svarchnoe proizvodstvo*, 2015, no. 5, pp. 49-53.
20. Pykin Iu.A., Anakhov S.V., Matushkin A.V. Plazmotron [Plasmotron]. Patent Rosiskaia Federatsiia no. 2584367 (2016).
21. Matushkin A.V., Pykin Yu.A., Anakhov S.V., Matushkina I.Y. About raising of the gas vortex stabilization efficiency in plasma torch for metal cutting. *Solid State Phenomena*, 2018, vol. 284, pp. 218-223.
22. Anakhov S.V., Pykin Iu.A., Matushkin A.V. Metodicheskie osnovy avtomatizirovannogo gazodinamicheskogo proektirovaniia v elektrolazmennyykh ekhnologiiakh [Methodical bases of automated gas-dynamic design in electroplasma technologies]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie. Materialovedenie*, 2018, vol. 20, no. 1, pp. 62-70.
23. Anakhov S.V., Pykin Iu.A., Matushkin A.V. Metodiki rascheta i proektirovaniia plazmotronov dlia rezki metallov [Methods of calculation and design of plasma torches for metal cutting]. *Svarchnoe proizvodstvo*, 2018, no. 7, pp. 19-24.
24. Kuznetsov V.M. Osnovy teorii shuma turbulentnykh strui [The basics of turbulent jet noise theory]. Moscow: Fizmatlit, 2008, 240 p.
25. Anakhov S.V., Pykin Yu.A., Matushkin A.V. Narrow jet plasma as the energy efficient and safe technology for metal cutting. *Solid State Phenomena (Material Sci. Forum)*, 2016, vol. 870, pp. 523–527.

Получено 03.07.2019

Опубликовано 26.09.19

Сведения об авторах

Анахов Сергей Вадимович (Ekaterinburg, Россия) – кандидат физико-математических наук, завкафедрой математических и естественно-научных дисциплин Российского государственного профессионально-педагогического университета; директор ООО «Техноплазма»; e-mail: sergej.anahov@rsvpu.ru.

Пыкин Юрий Анатольевич (Ekaterinburg, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры физико-химических технологий защиты биосферы Уральского государственного лесотехнического университета; гендиректор ООО НПО «Полигон»; e-mail: yappolygon@mail.ru.

Матушкин Анатолий Владимирович (Ekaterinburg, Россия) – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры технологий сварочного производства Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина; e-mail: 227433@yandex.ru.

About the authors

Sergey V. Anakhov (Ekaterinburg, Russian Federation) – Ph.D. in Physics and Mathematics Sciences, Head of the Department of Mathematical and Natural Sciences, Russian State Vocational-Professional University, Director of LLC "Technoplasm"; e-mail: sergej.anahov@rsvpu.ru.

Yuri A. Pykin (Ekaterinburg, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Professor, Department of Physicochemical Technologies of Biosphere Protection, Ural State Forest Engineering University, Director General of NPO "Polygon"; e-mail: yappolygon@mail.ru.

Anatoly V. Matushkin (Ekaterinburg, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Senior Lecturer, Department of Welding Production Technologies, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Eltsin; e-mail: 227433@yandex.ru.