

УДК 620.18:621.791

DOI:10.30987/2223-4608-2021-5-7-13

С.В. Анахов, к.ф.-м.н.

(Российский государственный профессионально-педагогический университет,
620012, г. Екатеринбург, ул. Машиностроителей, 11),

А.В. Матушкин, к.т.н.

(Уральский федеральный университет, 620078, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19),

Ю.А. Пыкин, д.т.н.

(Уральский государственный лесотехнический университет,
620038, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, 37)

E-mail: sergej.anahov@rsvpu.ru

Газодинамические аспекты проектирования нового металлорежущего плазматрона

Проведен анализ влияния различных конструктивных решений системы газодинамической стабилизации плазматронов для резки металлов на эффективность выравнивания скоростей газовых потоков по сечению газового тракта. Предложена система вихревой стабилизации, использующая два завихрителя. Показан эффект улучшения надежности и качества плазменной резки.

Ключевые слова: плазматрон; проектирование; газодинамика; газовихревая стабилизация; численное моделирование.

S.V. Anakhov, Can. Sc. Physic-Math.

(Russian State Vocational Pedagogical University, 11, Machinostroiteley Str., Yekaterinburg, 620012)

A.V. Matushkin, Can. Sc. Tech.

(Urals Federal University, 19, Mira Str., Yekaterinburg, 620078)

Yu.A. Pykin, Dr. Sc. Tech.

(Urals State Forestry Engineering University, 37, Siberian Tract, Yekaterinburg, 620038)

Gas-dynamic aspects of new metal-cutting plasmatron design

The analysis of the impact of different design solutions for the system of plasmatron gas-dynamic stabilization for metal-cutting upon effectiveness of gas flow rate balance according to the section of a gas path is carried out. A system of turbulent stabilization, using two swirlers is offered. The effect of plasma cutting reliability and quality is shown.

Keywords: plsmatron; design; gas dynamics; gas-vortex stabilization; numerical simulation.

Плазменная резка металлов – одна из наиболее востребованных заготовительных технологий в машиностроении [1]. Высокая эффективность её применения для практически любой номенклатуры сталей в широком диапазоне толщин во многом определяется параметрами работы основного элемента технологии – плазматрона. Большинство представленных на рынке плазматронов отечественного производства в настоящее время уступают по показателям производительности, качества реза и энергоэффективности лучшим образцам зарубежного производства, что ставит задачу поиска новых конструкторских решений одной из наиболее актуальных для российских проектировщиков плазменного оборудования [2].

В проведенных ранее исследованиях было показано, что эффективность работы металлорежущих плазматронов во многом зависит от организации в них системы газодинамической стабилизации (ГДС) плазменной дуги (струи) [3]. Применяемая в большинстве плазматронов однопоточная (одноконтурная) система ГДС опирается на газовихревой метод стабилизации, основанный на использовании одного завихрителя с последующим обжатием плазменной дуги вихревым потоком плазмообразующего газа (ПОГ) стенками сопла плазматрона [4]. Неравномерность подачи газа в завихритель приводит к неравномерному распределению параметров потока ПОГ в сопле плазматрона, вызывая тем самым неста-

бильность параметров дуги (струи), а следовательно, и параметров эффективности плазменной резки (качества реза, надежности работы и т.д.) [5]. Для решения данной проблемы предложено несколько конструктивных вариантов организации системы ГДС в плазматронах, один из которых анализируется в данной работе.

Рассматривая скорость газового потока в качестве одного из ключевых параметров, определяющего работу системы ГДС, были введены параметры равномерности скорости, определяющие стабильность её распределения в контрольных сечениях газоздушного тракта (ГВТ) плазмотрона. Ранее было показано [6], что в качестве таких критериев могут быть выбраны: соотношение между максимальным и минимальным значениями скорости (отно-

шение вариации) L , среднее линейное отклонение (СЛЮ) a значений скорости по средней линии сечения, среднее квадратическое отклонение (СКО) S и коэффициент вариации скорости F . Сами скорости определялись в процессе численного моделирования газодинамических параметров в ГВТ 3D-модели плазмотрона в приложении FlowWorks программной среды SolidWorks (степень дискретизации – от 200 до 900 расчетных точек на контрольную линию сечения).

На рис. 1 показан ГВТ разработанного однопоточного металлорежущего плазмотрона, обеспечивающего за счет компоновки отдельных участков ГВТ выравнивание потока ПОГ и максимальную эффективность работы системы ГДС.

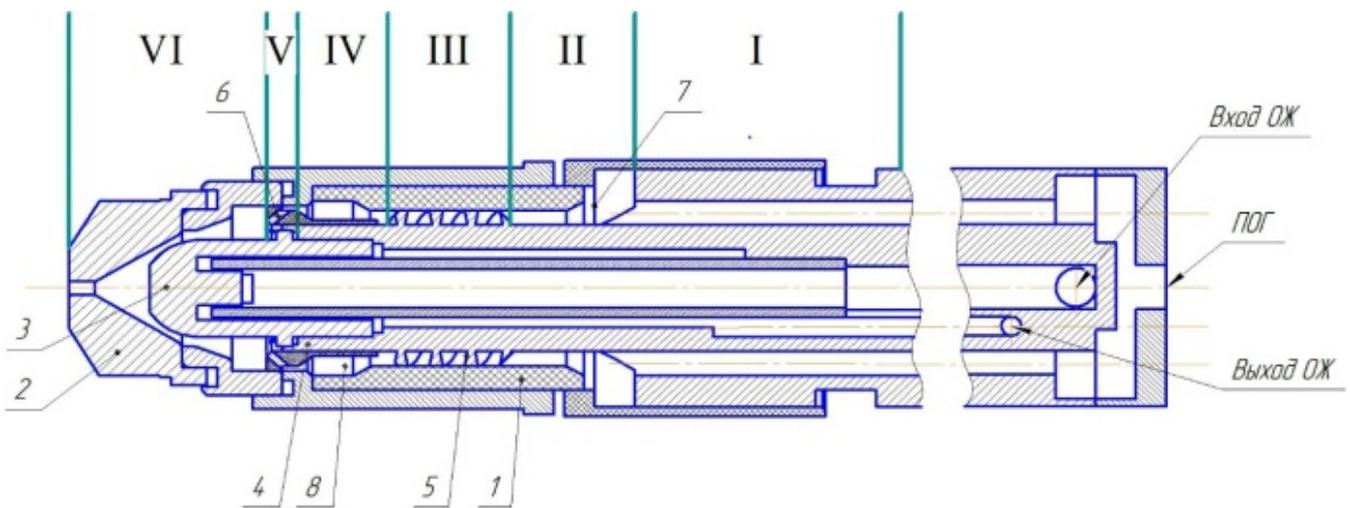


Рис. 1. Конструктивная схема плазмотрона:

1 – изолятор; 2 – сопло; 3 – катод; 4 – электрододержатель, 5 – предварительный (формирующий) завихритель; 6 – основной (стабилизирующий) завихритель; 7 – 1-я расширительная камера (камера смешения); 8 – 2-я расширительная камера (камера стабилизации). Участки ГВТ: I – подача ПОГ; II – предварительное выравнивание потока; III – предварительное завихрение; IV – основное выравнивание потока; V – основное завихрение; VI – сопловой узел. ОЖ – охлаждающая жидкость; ПОГ – плазмообразующий газ

Конструкция ГВТ данного плазмотрона отличается от большинства общепринятых схем симметричной подачей газа в систему ГДС, а также использованием 2-х завихрителей (предварительного и основного) и 2-х участков выравнивания потока ПОГ.

Рассмотрим 3 этапа решения проектной задачи создания плазмотрона с максимально эффективной системой ГДС. Подобная задача должна решаться по критериям оптимизации с учетом требований материалоемкости и технологичности, предъявляемых к плазмотронам.

На первом этапе определялась протяжен-

ность участка II – расстояние между двумя входными отверстиями ввода ПОГ в область 7 для первичного выравнивания скорости потока по сечению каналов и предварительным завихрителем 5. Для этого следует рассмотреть, как происходит выравнивание потока ПОГ по сечению каналов после его выхода из 2-х симметрично расположенных отверстий (см. рис. 1) в кольцевую полость 7. Отверстия имеют наклон относительно оси плазмотрона в интервале $60^\circ \dots 70^\circ$ для придания начальной закрутки потока ПОГ. Указанный интервал совпадает с диапазоном угла закрутки предварительного (формирующего) завихрителя, что

позволяет при достижении эффективных значений распределения скорости на участке предварительного выравнивания потока II избежать существенных потерь кинетической энергии и аэродинамического напора потока ПОГ при входе в формирующий завихритель.

Фиксирование расчетных значений скорости потока ПОГ по сечению проводилось на удалении от данных входных отверстий на расстоянии от 1 до 10 мм. По результатам расчетов отношения минимальной и максимальной скоростей потока при удалении от точки ввода на участок II была установлена устойчивая тенденция выравнивания потока ПОГ. При этом начиная с 6 мм от точки ввода процесс выравнивания замедляется, поэтому с позиции уменьшения материалоемкости плазмотрона, целесообразно разместить предварительный завихритель на расстоянии 6...8 мм от точки ввода, что обеспечивает снижение разницы между минимальным и максимальным значениями скоростей до 40...50 %.

На втором этапе определялось необходимое расстояние между предварительным и основным завихрителями на участке IV ГВТ плазмотрона (см. рис. 1). Для этого определялась эффективность выравнивания потока ПОГ по сечению каналов после его выхода из 4-х симметрично расположенных прямоугольных пазов предварительного завихрителя в кольцевую полость 8 2-ой расширительной камеры (см. рис. 1) с наклоном относительно оси плазмотрона в интервале $60^\circ \dots 70^\circ$. Фиксирование расчетных значений скорости потока ПОГ по сечению проводилось также, как и на участке II на удалении от выхода предварительного завихрителя на расстоянии от 1 до 10 мм. По результатам расчетов было установлено, что также, как и на первом этапе, наблюдается устойчивая тенденция выравнивания потока ПОГ с более высокой эффективностью, чем на участке II. При этом начиная с расстояния 7...8 мм от точки ввода значение, характеризующее степень выравнивания скорости потока по сечению (отношение вариации L), снижается ниже 10 %, поэтому с позиции уменьшения материалоемкости плазмотрона, целесообразно разместить основной завихритель на расстоянии 8...12 мм от выхода предварительного завихрителя.

На третьем этапе проверялась эффективность работы основного завихрителя. Для этого было рассмотрено, как происходит выравнивание потока ПОГ по сечению канала ГВТ после выхода ПОГ из симметрично расположенных отверстий (рис. 2) основного завихри-

теля в кольцевую полость (количество отверстий может изменяться от 8 до 16, в зависимости от величины тока резки).

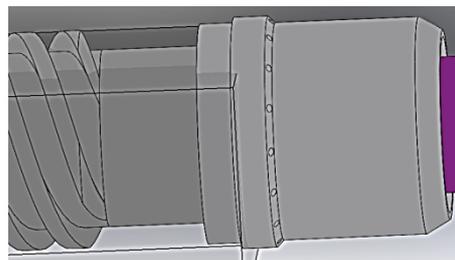


Рис. 2. Схема подачи газа из основного завихрителя в сопловой узел (участки V и VI)

При этом пазы имеют аналогичный параметрам предварительного завихрителя наклон относительно оси плазмотрона в интервале $60^\circ \dots 70^\circ$ для стабилизации закрутки потока ПОГ и обеспечения необходимого уровня обжатия плазменной дуги. Указанные значения наклона были выбраны в целях обеспечения наилучших для данной конструкции плазмотрона значений производительности, зависящей от соотношений осевой и тангенциальной составляющих скорости ПОГ.

Газодинамический анализ показывает, что увеличение угла наклона отверстий выше указанных значений приводит к росту тангенциальной составляющей скорости потока, что положительно влияет на эффективность обжатия дуги и фиксации катодного пятна на поверхности электрода. Однако при этом в экспериментальных исследованиях было замечено снижение производительности до 10...15 %, обусловленное снижением динамической составляющей потока газа в осевом направлении. Напротив, уменьшение угла наклона отверстий приводит к значительному увеличению осевой составляющей потока, что снижает эффективность обжатия дуги и степень ее стабилизации на поверхности электрода.

В результате появляются колебания дуги внутри соплового узла, возникает возможность появления двойного дугообразования, что ведет к повышенному износу деталей плазмотрона, а следовательно, к снижению качества, надежности и производительности резки. Фиксирование расчетных значений скорости потока ПОГ по сечению проводилось также как и на ранее рассмотренных этапах на удалении от выхода основного завихрителя от 1 до 10 мм (рис. 3).

На графике отношения минимальной и

максимальной скоростей потока (рис. 4) видно, что на данном участке также наблюдается устойчивая тенденция выравнивания потока ПОГ с высокой степенью эффективности.

При этом начиная с 5 мм от точки ввода значение, характеризующее степень выравнивания скорости потока по сечению, снижается ниже 6...7%. С учетом того, что на расстоянии 6...7 мм от выхода отверстий завихрителя расположен торец катода, можно сделать вывод об обеспечении надежной стабилизации дуги на поверхности электрода. Очевидно также, что показанные расчеты могут быть произведены без учета нагрева ПОГ плазменной дугой в сопловом узле плазматрона, влияющего на газодинамические параметры потока ПОГ за пределами торца катода.

На рис. 5 представлен сравнительный график изменения коэффициента вариации скорости F ($F = S/\langle v \rangle$, где S – среднее квадратическое отклонение скорости, $\langle v \rangle$ – среднее значение скорости в сечении ГВТ) в зависи-

мости от расстояния от точки ввода газа на рассмотренных выше участках ГВТ.

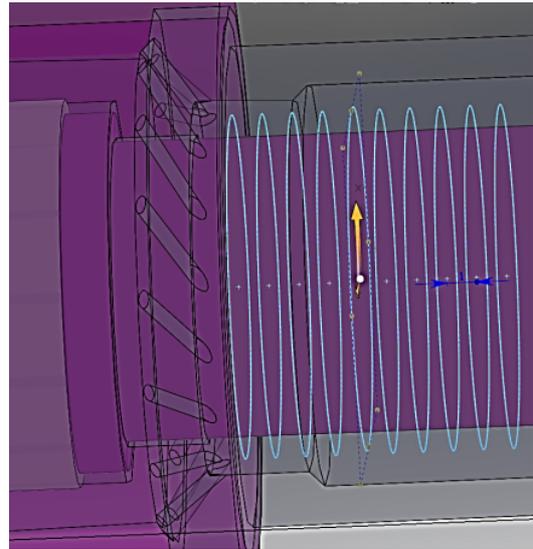


Рис. 3. Распределение ПОГ и расчет скорости на участке подачи газа из основного завихрителя в сопловой узел

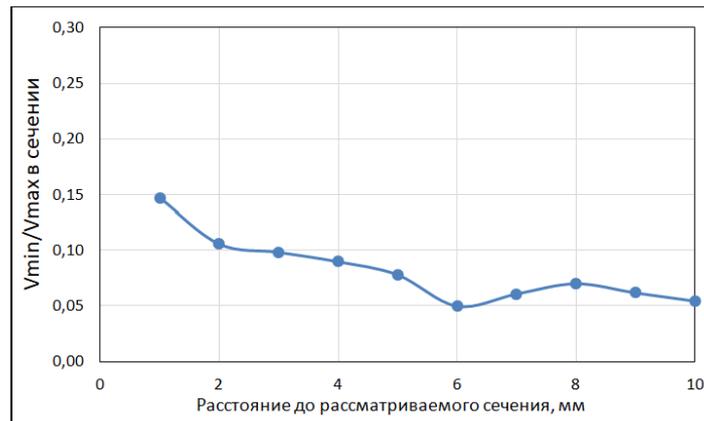


Рис. 4. График изменения отношения вариации скорости потока при удалении от точки ввода на участке подачи газа из основного завихрителя в сопловой узел

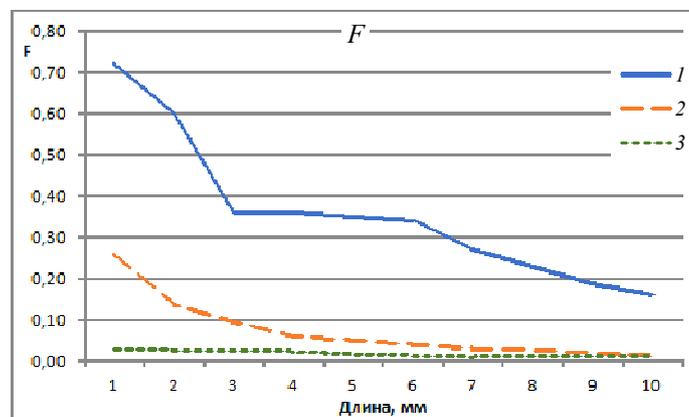


Рис. 5. График изменения коэффициента вариации скорости F при удалении от точки ввода газа: 1 – на участке II; 2 – на участке IV; 3 – на участках V и VI

Анализ представленных данных свидетельствует об эффективности разработанной системы ГДС, обеспечивающей повышение равномерности распределения скорости примерно в 70 раз (от начальной до конечной точек расчетной части ГВТ). При этом, если на первом этапе анализа (участок II) коэффициент F снижается примерно в 4 раза, на втором (участок IV) – в 18 раз, то на третьем этапе (участки V и VI) наблюдается высокая степень как стабилизации потока по длине, так и в сечении ГВТ. При этом рассматриваемая конструкция выполняет функцию организации газодинамического потока ПОГ, обеспечивая

повышение средней скорости газа $\langle v \rangle$ от 25...30 м/с на первом этапе, до 100...110 м/с (рис. 6) на этапе ввода газа на участок его нагрева плазменной дугой с последующим обжатием и ускорением в сопловом узле плазмотрона.

Проанализированная выше методами численного моделирования конструкция плазмотрона была реализована в виде опытно-промышленной модели однопоточного плазмотрона для прецизионной резки металлов малых и средних толщин ПМВР-5.3 (рис. 7) (производитель – ООО НПО «Полигон», г. Екатеринбург).

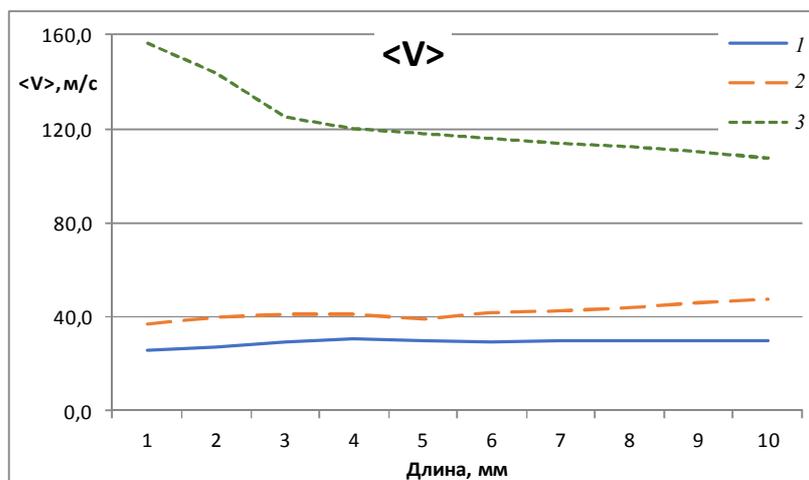


Рис. 6. График изменения средней скорости $\langle v \rangle$ ПОГ при удалении от точки ввода газа: 1 – на участке II; 2 – на участке IV; 3 – на участках V и VI



Рис. 7. Опытно-промышленная модель плазмотрона ПМВР-5.3 для прецизионной резки металлов малых и средних толщин

На представленных на рис. 8 фотографиях, показаны комплекты катод-сопло для случая разработанной и проанализированной выше системы организации течения потока ПОГ (а) и базовой схемы стабилизации течения газа (б). При анализе рабочих поверхностей катодов было обнаружено, что на одном катоде (рис. 8, а) расположение катодного пятна находится четко по центру поверхности катода и имеет четкие очертания, а на другом катоде (рис. 8, б) наблюдается смещение катодного

пятна относительно центра катода, при этом очертания пятна имеют плавные контуры. Представленный эффект свидетельствует о высоком уровне стабилизации потока ПОГ, достигнутом в сопловом узле плазмотрона ПМВР-5.3.

Анализ фото на рис. 8 позволяет также оценить влияние степени стабилизации потока ПОГ на износ сопла. В плазмотроне ПМВР-5.3 мы наблюдаем равномерный износ сопла как с наружной, так и с внутренней его поверхности (см. рис. 8, а). При этом центральное отверстие сопла не имеет видимых повреждений, сохраняя цилиндрическую форму. В базовом случае (см. рис. 8, б) наблюдается увеличенная и неравномерная выработка (износ) поверхностей сопел как с наружной, так и с внутренней поверхности, а также разрушение цилиндрического канала сопел, что закономерно влияет как на параметры выходной плазменной струи, так и на качество поверхности реза.

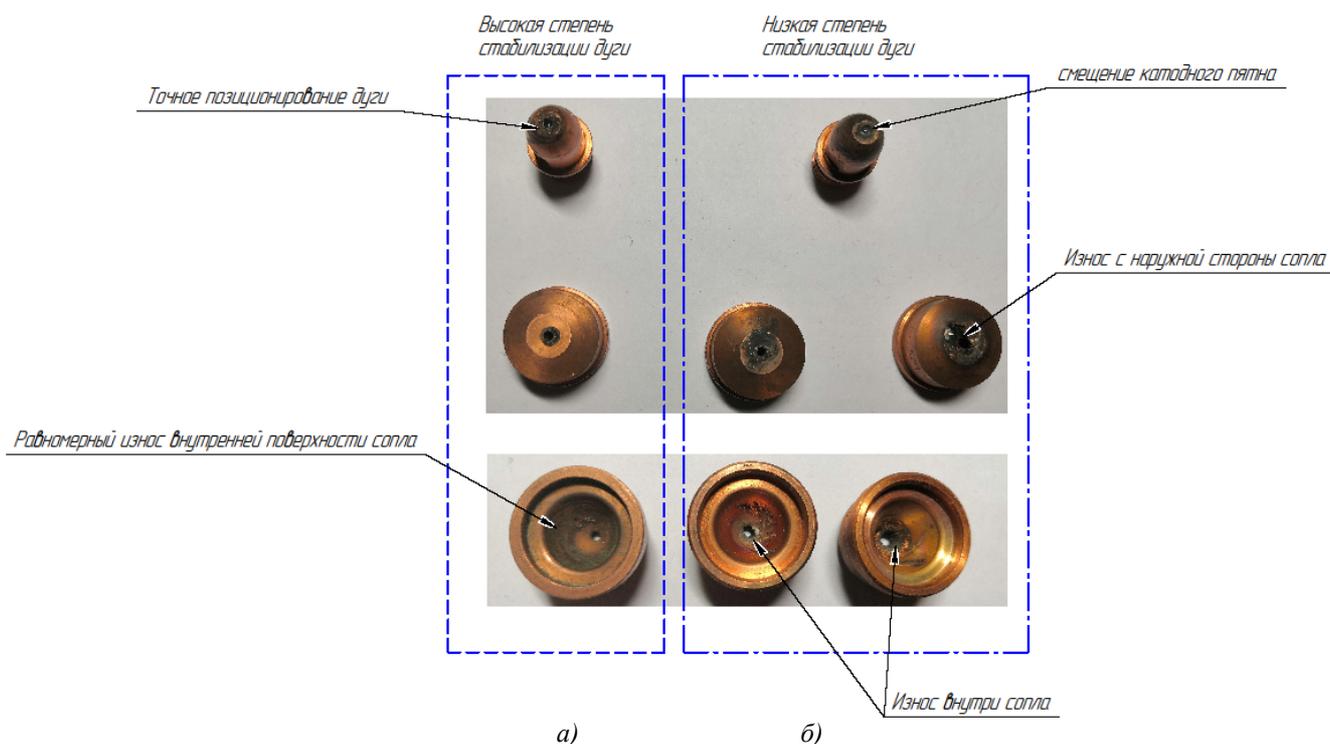


Рис. 8. Анализ износа рабочих поверхностей комплектов сопло-катод при работе (200 включений на токе 130А): а – плазмотрона ПМВР-5.3 с модернизированной системой ГДС; б – плазмотрона с базовой системой ГДС (ПМВР-М [5])

Об эффективности разработанной системы ГДС свидетельствуют и приведенные на рис. 9 и 10 результаты практических испытаний плазмотронов на качество реза.

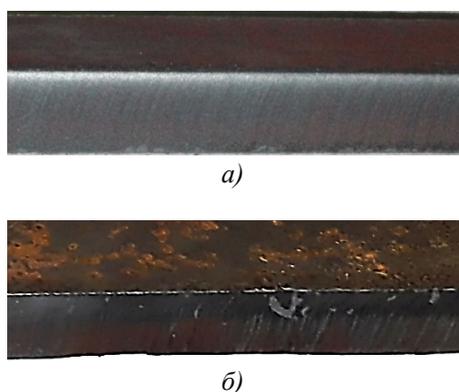


Рис. 9. Качество плазменной резки (сталь Ст30Пс, толщина образца 10 мм): а – плазмотроном ПМВР-5.3; б – базовым плазмотроном ПМВР-М

Резка производилась на стали Ст30Пс при следующих параметрах работы плазмотрона: ток резки – 120 А; напряжение резки ~180 В; давление ПОГ ~ 4,5 атм.; диаметр сопла – 1,9 мм; вылет плазмотрона – 6...7 мм. Скорость резки была выбрана в зависимости от толщины листа стали и соответствовала 1,5 м/мин при толщине 10 мм и 0,3 м/мин при

толщине 36 мм. На рис. 9 отчетливо видно, что поверхность реза, полученная с применением нового плазмотрона ПМВР-5.3, равномерная с низким уровнем шероховатости поверхности, а при резке базовым плазмотроном наблюдается неравномерность поверхности реза с чередованием участков с низким увеличенным уровнем шероховатости поверхности.

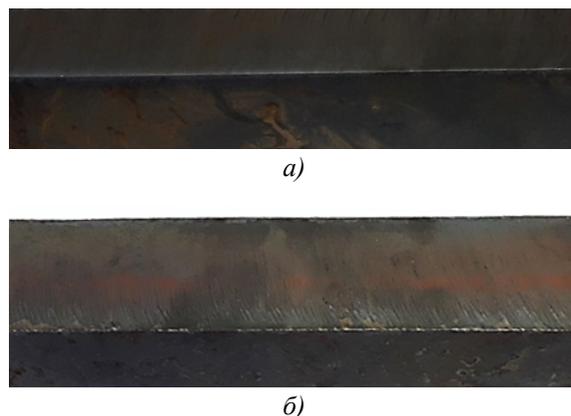


Рис. 10. Качество плазменной резки плазмотроном ПМВР-5.3 (сталь Ст30Пс): а – толщина образца 20 мм; б – толщина образца 36 мм

Показанный эффект объясняется более низкой степенью стабилизации плазменной дуги в базовом плазмотроне, приводящей к повышенным ее колебаниям, а следовательно, к снижению качества поверхности реза. О

достигнутой высокой степени ГДС в новом плазматроне ПМВР-5.3 свидетельствуют и фото представленных на рис. 10 образцов реза из более толстого металла. На данных фотографиях также наблюдается образование качественной поверхности реза с низким уровнем шероховатости поверхности.

С использованием указанного плазматрона было выполнено исследование структурообразования зоны термического влияния при узкоструйной воздушно-плазменной резке листа стали Ст30Пс при следующих параметрах работы плазматрона: ток резки – 120 А; напряжение резки ~180 В; давление ПОГ ~ 4,5 атм.; диаметр сопла – 1,9 мм; вылет плазматрона – 6...7 мм. Скорость резки была выбрана в зависимости от толщины листа стали и соответствовала 1,5 м/мин при толщине 10 мм и 0,3 м/мин при толщине 36 мм.

Представленные в данной работе результаты теоретического и экспериментального анализа свидетельствуют о возможности успешного решения проблемы повышения эффективности работы металлорежущих плазматронов за счет повышения степени равномерности распределения газодинамических параметров потока плазмообразующего газа. Данный эффект достигается за счет внедрения оптимизированных конструктивных решений на отдельных участках газозащитного тракта системы газодинамической стабилизации плазматронов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Чередниченко, В.С., Аньшаков, А.С., Кузьмин, М.Г.** Плазменные электротехнологические установки. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – 602 с.
2. **Анахов, С.В.** Принципы и методы проектирования в электроплазменных и сварочных технологиях: учебное пособие. – Екатеринбург: Изд-во РГППУ, 2014. – 144 с.
3. **Анахов, С.В., Пыкин, Ю.А., Матушкин, А.В., Шакуров, С.А.** Газодинамические особенности проекти-

рования плазматронов // Сварочное производство. – 2011. – №12. – С. 10-15.

4. **Жуков, М.Ф., Аньшаков, А.С.** Основы расчета плазматронов линейной схемы. – Новосибирск: ин-т теплофизики СО АН СССР, 1979. – 146 с.

5. **Анахов, С.В., Пыкин, Ю.А., Матушкин, А.В.** Исследование систем газовихревой стабилизации плазматронов // Сварочное производство. – 2015. – №4. – С. 20-24.

6. **Анахов, С.В., Пыкин, Ю.А., Матушкин, А.В.** Температурные корреляции параметров газовихревой стабилизации металлорежущих плазматронов // Вестник ПНИПУ. Машиностроение. Материаловедение. – 2018. – Т. 20. – №3. – С. 29-37.

REFERENCES

1. Cherednichenko, V.S., Anshakov, A.S., Kuzmin, M.G. *Plasma Electro-technological Plants*. Novosibirsk: NSTU Publishers, 2011. – pp. 602.

2. Anakhov, S.V. *Principles and Methods of Design in Electro-plasma and Welding Technologies*: manual. – Yekaterinburg: RSPPU Publishers, 2014. – pp. 144.

3. Anakhov, S.V., Pykin, Yu.A., Matushkin, A.V., Shukurov, S.A. Gas-dynamic peculiarities of plasmatron design // *Welding Production*. – 2011. – No.12. – pp. 10-15.

4. Zhukov, M.F., Anshakov, A.S. *Fundamentals for Computation of Plasmatron with Linear Circuit*. – Novosibirsk: Institute of Thermophysics of SB of AS of the USSR, 1979. – pp. 146.

5. Anakhov, S.V., Pykin, Yu.A., Matushkin, A.V. Investigation of plasmatron gas-vortex stabilization systems // *Welding Production*. – 2015. – No.4. – pp. 20-24.

6. Anakhov, S.V., Pykin, Yu.A., Matushkin, A.V. Temperature correlations of gas-vortex stabilization parameters for metal-cutting plasmatoms // *Bulletin of PRIPU. Mechanical Engineering. Material Science*. – 2018. – Vol.20. – No.3. – pp. 29-37.

Рецензент д.т.н.
Евгений Юрьевич Раскатов

