

УДК 621.791.947.55

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ПЛАЗМОТРОНА НА КАЧЕСТВО РЕЗА ПРИ ПРЕЦИЗИОННОЙ ВОЗДУШНО-ПЛАЗМЕННОЙ РАЗДЕЛКЕ МЕТАЛЛА

Анахов С.В.¹, к.ф.-м.н., заведующий кафедрой математических и естественнонаучных дисциплин (sergej.anahov@rsvpu.ru)

Гузанов Б.Н.¹, д.т.н., заведующий кафедрой инжиниринга и профессионального обучения в машиностроении и металлургии (boris.guzanov@rsvpu.ru)

Матушкин А.В.², к.т.н., старший преподаватель кафедры технологии сварочного производства (227433@yandex.ru)

Пугачева Н.Б.³, д.т.н., главный научный сотрудник (nat@imach.uran.ru)

Пыкин Ю.А.⁴, д.т.н., профессор кафедры физико-химических технологий защиты биосферы (yappoligon@mail.ru)

¹ Российский государственный профессионально-педагогический университет (620012, Россия, Екатеринбург, ул. Машиностроителей, 11)

² Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

³ Институт машиноведения УрО РАН (ИМАШ УрО РАН) (620049, Россия, Екатеринбург, ул. Комсомольская, 34)

⁴ Уральский государственный лесотехнический университет (620032, Россия, Екатеринбург, ул. Сибирский тракт, 37)

Аннотация. Методами оптической интерферометрии и металлографического анализа исследована структура разделочных швов, полученных после резки стали марки 09Г2С плазматронами типа ПМВР-5, имеющими ряд конструктивных особенностей в системе газодинамической стабилизации плазменной дуги. Показано, что применение новых плазматронов позволяет получить более высокое качество реза на сталях 09Г2С средних толщин с высокой производительностью и меньшими энергетическими затратами. Металлографический анализ показал, что качественный состав структуры поверхности реза практически одинаков, поэтому приоритетным критерием для сравнительного анализа качества становятся характеристики микрогеометрии поверхности. Следует отметить, что оценка по этому параметру показывает высокое качество разделки практически по всей длине реза, так как влияние технологических особенностей вреза плазменной дуги в металл сказывается на расстоянии менее 0,3 мм от кромки листа. Применение дополнительных способов газодинамической стабилизации (симметрия подачи с двойной системой завихрения плазмообразующего газа) в плазматроне ПМВР-5.2 позволяет добиться дополнительных преимуществ по критерию качества поверхности по сравнению с плазматроном ПМВР-5.1. Отмечен ряд особенностей, влияющих на качество реза при разделке металлов разных толщин под сварку в зависимости от угла наклона плазматрона при резке. Оценки твердости поверхностного слоя свидетельствуют о минимальных отклонениях от требований СТО Газпром 2-2.2-136-2007 (Инструкция по технологиям сварки при строительстве и ремонте промышленных и магистральных газопроводов) по твердости зоны термического влияния не более 300 HV. Это позволяет использовать в дальнейшем полученные исследованными плазматронами разделочные швы под сварку без удаления зон термического влияния. Применение новых плазматронов позволяет осуществлять прецизионную чистовую плазменную резку металлов, в том числе и в технологиях производства сварных соединений.

Ключевые слова: плазматрон, проектирование, зона термического влияния, структурные превращения, дефекты, качество, эффективность.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-2-155-162

ВВЕДЕНИЕ

Развитие современного машиностроения и ряда других отраслей техники во многом определяется технологиями и способами обработки конструкционных сталей. Особое внимание уделяется разработке эффективных методов резки и раскроя листовых сталей для последующей сварки ответственных металлоконструкций [1, 2]. Следует заметить, что существующие тради-

ционные процессы разделения материалов, основанные на механическом и физико-механическом воздействиях, имеют ряд существенных недостатков из-за весьма низкой производительности и практической невозможности проводить разделку разнотолщинной листовой стали по сложному криволинейному контуру [3]. Весьма перспективными в настоящее время считаются плазменные способы резки [4], в частности с использованием технологии воздушно-плазменной обработки

металлов [5 – 7]. Однако здесь необходимо учитывать, что при всех несомненных достоинствах технологии плазменной резки [8 – 10] процесс разделки листовой стали часто сопровождается разнообразными отклонениями по качеству поверхности реза, которые существенно зависят как от режимов обработки [11 – 13], так и от конструкции самого плазмоторна [14, 15].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Сравнительный анализ эффективности плазменной резки металлических материалов в зависимости от конструктивных особенностей плазмоторнов показал, что даже при рационально определенных режимах обработки структурообразование поверхности реза будет во многом определяться особенностями электродуговых узлов и газовоздушных трактов (ГВТ) режущих плазмоторнов [16]. В то же время среди разработок отечественного электроплазменного оборудования практически отсутствуют инструментальные плазмоторны для прецизионной резки стальных листов при толщине проката до 40 мм, обеспечивающие повышенную точность и качество реза кромок, высокую материальную и энергетическую эффективность. Для решения подобных задач по результатам моделирования газодинамических и теплофизических процессов было определено влияние конструкции газовоздушного тракта плазмоторна на течение плазмообразующего газа (ПОГ), что позволило разработать и создать модернизированный плазмоторн с дополнительным обжатием плазменной

дуги, обладающий улучшенными характеристиками по большей части параметров качества реза [17].

Как было показано, одним из значимых условий, влияющих на качество плазменной резки, является эффективность работы системы газовихревой стабилизации (ГВС) в плазмоторнах для воздушно-плазменной обработки металлов [18]. В качестве критерия эффективности ГВС можно использовать степень равномерности распределения параметров потока ПОГ в контрольных сечениях (в первую очередь – в цилиндрическом канале соплового узла) газовоздушного тракта плазмоторна.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве моделей для исследования были взяты разработанные и полученные в ООО НПО «Полигон» (г. Екатеринбург) плазмоторны ПМВР-5.1 и ПМВР-5.2 для резки металла. Плазмоторны этого типа относятся к серии однопоточных плазмоторнов ПМВР-5 со встроенным ступенчатым газодинамическим фильтром и повышенной производительностью для работы при токах до 200 А. Их конструкции имеют по сравнению с широко применяемым однотипным плазмоторном ПМВР-М модернизированную систему подготовки и выравнивания потока ПОГ перед входом в сопловой блок. Такая система включает в себя следующее (последовательно): расширительную камеру, предварительный (формирующий) завихритель, вторые расширительную камеру и основной (стабилизирующий) завихритель. Отличие плазмоторна ПМВР-5.2 (рис. 1) от ПМВР-5.1 состоит

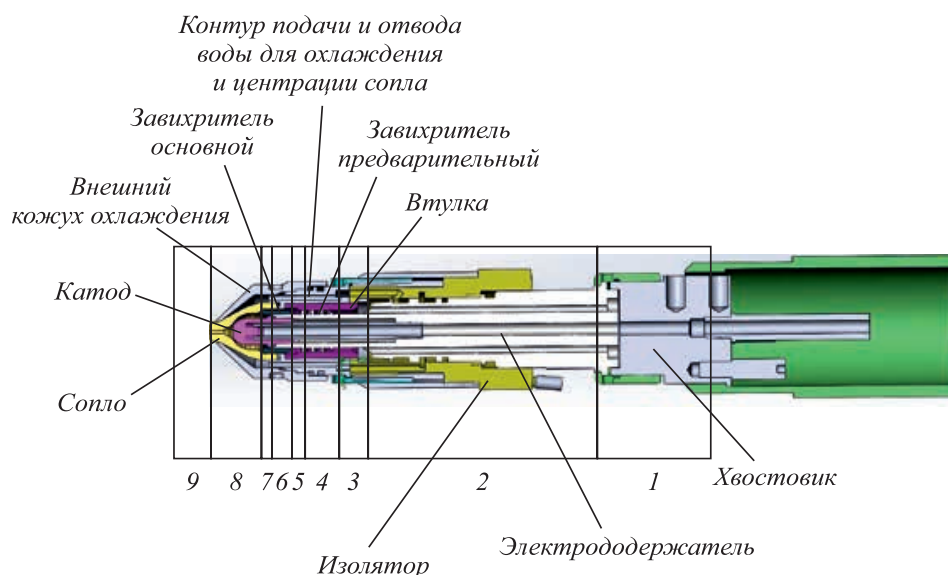


Рис. 1. Конструктивная схема плазмоторна ПМВР-5.2 с двумя завихрителями в системе газовихревой стабилизации:

- 1 – участок ввода газа; 2 – каналы подачи ПОГ в зону подготовки и выравнивания потока ПОГ (участки 3 – 6);
- 3 – расширительная камера смешения потоков; 4 – предварительный (формирующий) завихритель; 5 – вторая расширительная камера;
- 6 – второй стабилизирующий завихритель; 7, 8 – сопловой узел; 9 – зона свободной плазменной дуги

Fig. 1. Design diagram of PMVR-5.2 plasma torch with two swirlers in gas-vortex stabilization system:

- 1 – gas inlet section; 2 – channels for PFG supplying to the zone of preparation and alignment of PFG flow (sections 3 – 6);
- 3 – expansion chamber for flows mixing (MS); 4 – preliminary (forming) swirler (FS); 5 – 2nd expansion chamber; 6 – 2nd stabilizing swirl (SS);
- 7, 8 – nozzle unit; 9 – free plasma arc zone

в способе подачи ПОГ в камеру расширения. Как известно, асимметрия подачи ПОГ в расширительную (успокоительную) камеру является одной из основных причин низкой эффективности ГВС, наблюдаемой в большинстве плазмотронов с однопоточной схемой ГВТ. С целью минимизации влияния этого фактора в плазмотроне ПМВР-5.2 плазмообразующий газ подается в предварительный завихритель через два симметрично расположенных относительно оси плазмотрона отверстия, а в ПМВР-5.1 – через одно асимметричное отверстие.

Участок подачи газа в формирующий завихритель (ФЗ) помимо функции распределения потока по каналам выполняет роль отражателя, обеспечивая образование в кольцевом канале камеры смешения (КС) зон с обратной циркуляцией газа. После взаимодействия со стенкой ввода газа в ФЗ поток газа частично изменяет направление движения на радиальное, рассеивая кинетическую энергию и повышая интенсивность вихреобразования в пределах КС. Размеры камеры смешения на участке 3 ГВТ выбирали в результате расчетных оптимизационных процедур по общепринятым конструктивным соображениям для плазмотронов подобного типа [19]. Формирующий завихритель имеет четыре канала ввода газа и расположен на расстоянии 4 – 5 калибров (13 – 16 мм) от точки ввода ПОГ в камеру смешения. Такой завихритель является предварительным и выполняет функцию придания потоку ПОГ направления, совпадающего с направлением закрутки второго основного завихрителя (участок б). Выбор расположения ФЗ сделан в соответствии с ранее сделанными оценками для плазмотрона ПМВР-5.1 (2М) [17]. Сопловой узел выполнен из стандартных серийно выпускаемых пар сопла и катода.

Исследования качества плазменной резки проводили на плоских пластинах из стали марки 09Г2С толщиной 14 мм под разными углами наклона плазмотрона по схеме, представленной на рис. 2. Режимы резки приведены в табл. 1.

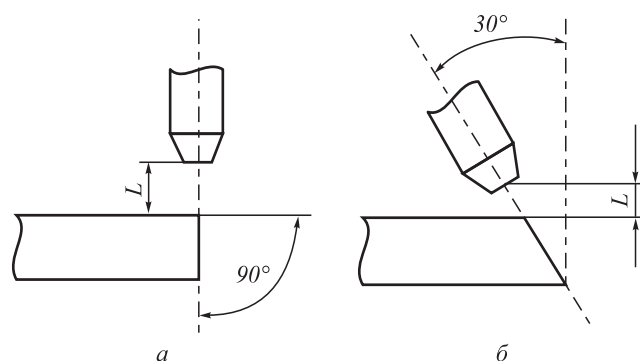


Рис. 2. Схема резки контрольных пластин под углом 90° (а) и 30° (б)

Fig. 2. Scheme of control plates cutting at angle of 90° (a) and 30° (b)

Анализ микроструктуры образцов после плазменной резки в зависимости от конструкции плазмотрона был проведен с использованием микроскопа Neofot при увеличении от 100 до 160 крат. Идентификацию микроструктуры стали проводили по ГОСТ 8233 – 56 на предварительно подготовленных шлифах после травления в 4 %-ном растворе азотной кислоты в этиловом спирте.

Замеры твердости поверхностей, прилегающих к кромке реза металла, были проведены на приборе LEICA с программным обеспечением Materials Workstation при нагрузках 1000 г. Схема измерений приведена на рис. 3, результаты представлены в табл. 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Расчеты показали, что при подаче ПОГ в предварительный завихритель плазмотрона (ПМВР-5.2) через два симметрично расположенных относительно оси отверстия по сравнению с плазмотроном (ПМВР-5.1) с одним ассиметричным отверстием степень обжатия плазменной струи увеличивается практически на 20 %. Подобное повышение прецизионности (табл. 1) узкоструйной плазмы оказало положительное влияние

Таблица 1

Режимы резки для образцов 4 и 5

Table 1. Cutting modes for samples 4 and 5

Параметр	Значение параметра для плазмотрона			
	ПМВР-5.1 (образец 1)		ПМВР-5.2 (образец 2)	
	1.1. Косой рез	1.2. Прямой рез	1.1. Косой рез	1.2. Прямой рез
Сила тока дуги, А	115	88	115	88
Напряжение дуги, В	200	180	200	180
Скорость резки, м/мин	1,10	0,65	1,25	0,75
Диаметр сопла, мм	1,7	1,7	1,7	1,7
Расстояние до среза сопла L, мм	5	5	5	5
Давление ПОГ, МПа	0,5	0,5	0,5	0,5

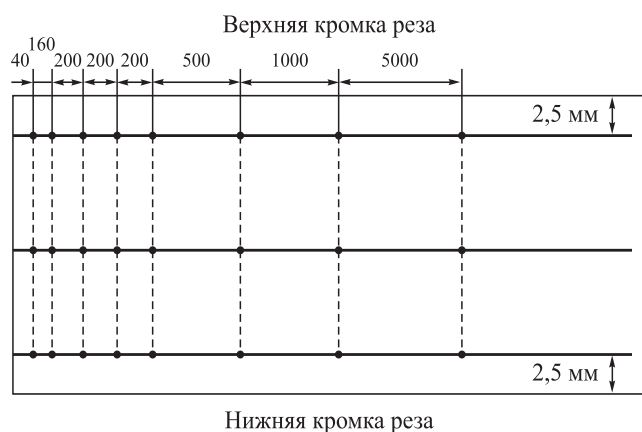


Рис. 3. Схема расположения точек замера твердости зоны термического влияния кромки реза

Fig. 3. Arrangement of points for measuring the hardness of thermal influence zone of the cutting edge

на режим резки исследуемой стали, что позволило повысить скорость раскроя листа и, как следствие, производительность процесса вне зависимости от схемы материалобработки в среднем на 15 %. Следует также отметить экспериментально определенные значения необходимого повышения величины типовых параметров плазмообразующей дуги при выполнении косоугольного реза под углом наклона плазматрона в 30°, которое обусловлено увеличением длины реза по толщине при рассматриваемой схеме разделки стали.

Визуальный анализ образцов, подвергнутых плазменной резке по выбранным режимам, позволил определить степень чистоты поверхности и геометрию кромок реза при использовании рассматриваемых плазматронов. Конструктивные особенности подачи ПОГ в разных моделях исследуемых плазматронов не привели к существенным отличиям макрокартины состояния поверхности реза. Как показал внешний контроль (рис. 4), на всех исследованных образцах на нижних кромках практически не обнаружено образования графа и налипания капель расплавленного металла. Кроме того, не выявлено оплавления и скругления верхней кромки, что обеспечило практически нулевое угловое отклонение реза. На вырезанных темплетях обнаружено, что качество самой поверхности по длине реза

во многом определяется расстоянием от места начала резки плазменной струи в торец листа.

В табл. 3 приведены результаты измерения микрогеометрии поверхности реза на разных участках по длине шва раскроя. Шероховатость поверхности исследовали с помощью оптического интерферометра Veeco на разных по размеру индицируемых участках рельефа.

На месте вреза плазменной струи в металл поверхность реза имеет максимальные значения средней шероховатости (Ra) и максимальную высоту (Rz) профиля, причем с увеличением площади исследуемой поверхности эти показатели значительно возрастают, что характеризует крайнюю нерегулярность микро-рельефа.

В начале реза, когда режим работы плазматрона еще не вышел на регулируемые стабильные показатели, за счет скачков силы тока и низкой скорости реза происходит оплавление краев верхних борозд, возрастает средняя высота от впадины до вершины, что способствует увеличению интервала борозд и возникновению значительной неровности поверхности реза (рис. 5, а).

Однако уже на расстоянии 0,25 – 0,30 мм от кромки режим плазменной резки стабилизируется и достигает установленных значений по всем заданным параметрам вплоть до окончания обработки. В результате топограмма поверхности реза по всей длине становится

Результаты измерения твердости HV1

Table 2. Results of HV1 hardness measurement

Расстояние от поверхности, мкм	Твердость HV1 образцов		
	3.2	1.1	2.2
40	364	380	355
160	246	210	313
200	210	196	228
200	205	197	206
200	198	208	202
500	201	201	196
1000	202	193	187
5000	196	206	186

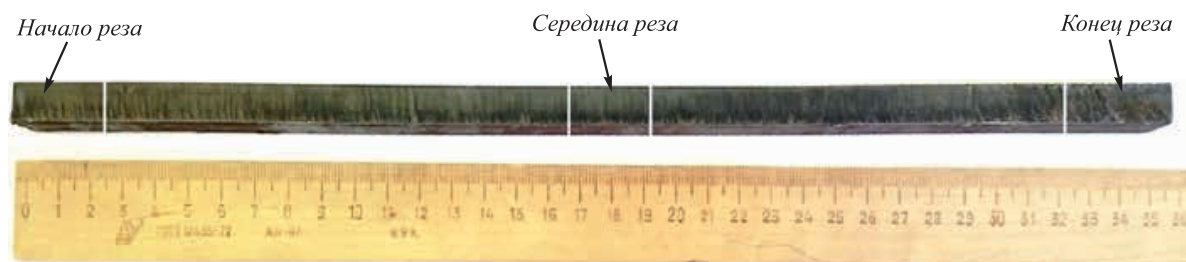


Рис. 4. Внешний вид образца после прямой плазменной резки листа стали плазматроном ПМВР-5.1 и схема выреза темплетов

Fig. 4. Appearance of the sample after direct plasma cutting of steel sheet by PMVR-5.1 plasma torch and templet cutting scheme

Т а б л и ц а 3

Результаты исследования поверхности на разных участках по длине стального листа

Table 3. Results of the surface study of different parts along the length of steel sheet

Схема вырезки темплетов (номер образца)	Ra, мкм, для		Rz, мкм, для	
	малого участка	большого участка	малого участка	большого участка
Начало реза (3.1)	7,34	43,94	41,75	245,87
Середина реза (3.2)	2,78	5,62	21,22	89,63
Конец реза (3.3)	3,45	6,66	25,81	67,28

практически одинаковой при резке уменьшении нормируемых показателей (рис. 5, б). В связи с этим для всех последующих исследований темплеты вырезали из средней части исследуемой полосы стали.

Сравнительное сопоставление с использованием методов количественной металлографии всех исследованных образцов показало, что вне зависимости от режима резки и типа плазмотрона микроструктура у них оказалась практически одинаковой, причем толщина внешней зоны плазменной резки составляет 400 мкм, а толщина зоны термического влияния не превышает 100 мкм (рис. 6).

По структуре зона плазменной резки представляет собой скрытопластинчатый перлит 2 балла с мелкопластинчатым расстоянием примерно 0,30 мкм. Зона термического влияния имеет перлитно-ферритную структуру с соотношением количества этих фаз 75/25, основа так-

же имеет перлитно-ферритную структуру с соотношением указанных выше фаз 20/80.

Из табл. 2 видно, что твердость приповерхностной зоны не превышает значений 380 HV1 вдоль всей поверхности реза, причем для всех образцов преобладают структурные области, лишь незначительно по твердости отличающиеся от материала основы.

В табл. 4 представлены результаты исследования микрорельефа поверхности образцов, полученных в результате плазменной резки стального листа по режимам (табл. 1).

ДИСКУССИЯ

Обобщая полученные результаты комплексных микроструктурных исследований, можно сказать, что качественный состав структуры в рассмотренных пределах технологических и конструктивных параметров испытаний практически не изменяется. Поэтому, как показано в работе [20], качество реза целесообразно оценивать по критерию микрогеометрии поверхности.

Как видно из табл. 3, наилучшие показатели при исследовании микрогеометрии поверхности реза были получены при использовании плазмотрона ПМВР-5.2 с двумя симметрично расположенными относительно оси плазмотрона отверстиями подачи ПОГ в предварительный завихритель. Следует отметить (рис. 7), что подобная конструктивная особенность сказалась на качестве реза с углом наклона плазмотрона 30°.

Анализируя представленные результаты, можно заключить, что они отвечают современным отечественным и зарубежным требованиям по качеству разделки [21 – 23], что позволяет расширить сферу при-

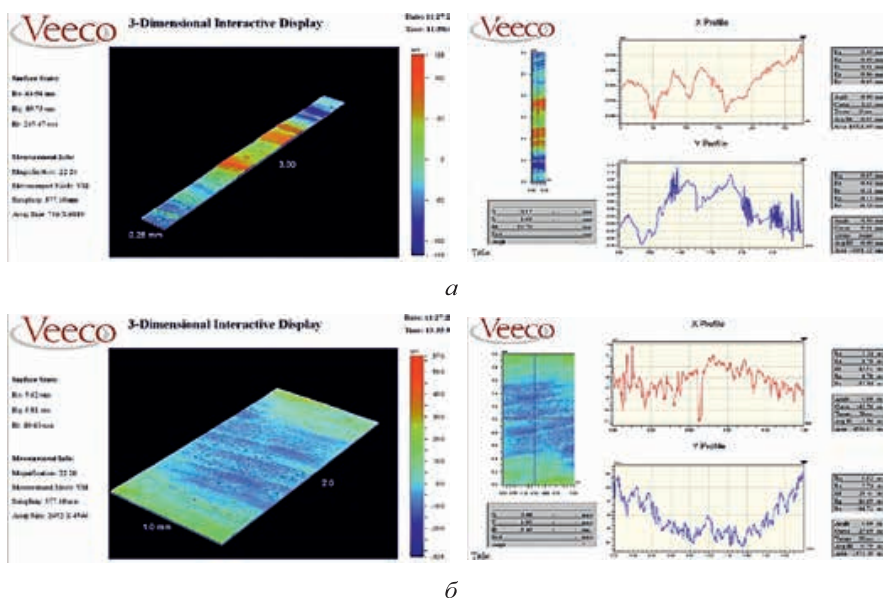


Рис. 5. Рельеф поверхности реза образца 3.1 (а) и 3.2 (б) (большой участок)

Fig. 5. Topography of cut surface for the sample 3.1 (a) and 3.2 (b) (a large part)

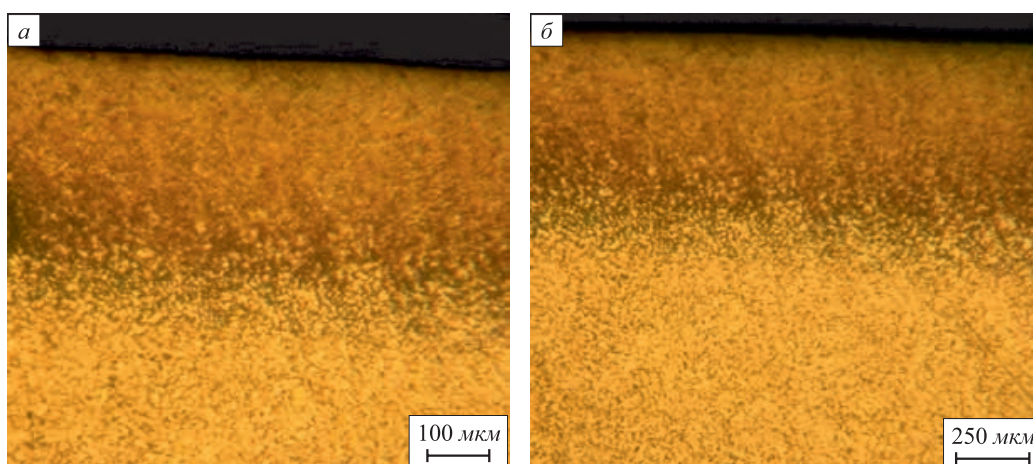


Рис. 6. Микроструктура образцов после плазменной резки

Fig. 6. Microstructure of the samples after plasma cutting

Т а б л и ц а 4

Результаты исследования поверхности реза в зависимости от конструкции плазматрона

Table 4. Results of the cutting surface study depending on plasma torch design

Тип плазматрона	Образец	Вид реза	<i>Ra</i> , мкм, для		<i>Rz</i> , мкм, для	
			малого участка	большого участка	малого участка	большого участка
ПМВР-5.1	1.1	Прямой рез	11,16	74,27	117,69	185,01
	1.2	Косой рез	9,67	62,35	112,63	152,56
ПМВР-5.2	2.1	Прямой рез	4,98	55,73	43,82	93,13
	2.2	Косой рез	3,70	23,82	9,21	74,65

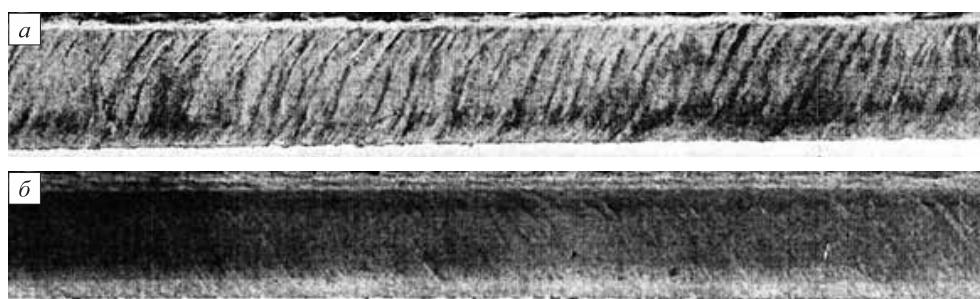


Рис. 7. Внешний вид поверхности реза в зависимости от угла наклона плазматрона:
a – прямой рез (образец 2.1); *б* – косой рез (образец 2.2)

Fig. 7. Appearance of cutting surface depending on angle of inclination of plasma torch:
a – straight cut (sample 2.1); *б* – oblique cut (sample 2.2)

менения плазменно-дуговых технологий по широкому кругу соответствующих производств.

Выводы

Применение новых методов газодуговой стабилизации в плазматронах ПМВР-5.1 и ПМВР-5.2 позволяет получать прецизионные резы, соответствующие первому классу качества по ГОСТ 14792 – 80 для стали

марки 09Г2С средних толщин. Качественный состав структуры поверхности реза практически одинаков, поэтому приоритетным критерием для сравнительного анализа качества становятся характеристики микрогеометрии поверхности. Следует отметить, что оценка по этому параметру показывает высокое качество разделки практически по всей длине реза, так как влияние технологических особенностей вреза плазменной дуги в металл сказывается на расстоянии менее 0,3 мм

от кромки листа. Применение дополнительных способов газодинамической стабилизации в плазматроне ПМВР-5.2 (симметрия подачи с двойной системой завихрения плазмообразующего газа) позволяет добиться дополнительных преимуществ по критерию качества поверхности по сравнению с плазматроном ПМВР-5.1. Оценки твердости поверхностного слоя свидетельствуют о минимальных (на глубинах порядка 40 мкм) отклонениях от требований (≤ 300 HV) СТО Газпром 2-2.2-136–2007, что позволяет использовать в дальнейшем полученные исследованными плазматронами разделочные швы под сварку без удаления зон термического влияния. Внедрение современных технологий плазменной резки позволяет сделать их более конкурентными по показателям эффективности, качества и ряду других значимых критериев.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Nikou V. Welded repair and maintenance in the space environment. – Massachusetts Institute of Technology, 2003. – 113. p.
2. Кайдалов А.А. Современные технологии термической и дистанционной резки конструкционных материалов. – Киев: Эко-технология, 2007. – 456 с.
3. Кавун Н.Н., Гусев В.Г. Сравнительный анализ способов резки листового материала. – В кн.: Перспективы развития технологий и оборудования в машиностроении / Под ред. А.А. Горохова. – Курск: Изд-во «Университетская книга», 2016. С. 50 – 53.
4. Эсбиян Э.М. Воздушно-плазменная резка: состояние и перспективы // Автоматическая сварка. 2000. № 12. С. 6 – 16.
5. Hoult A.P., Pashby I.R., Chan K. Fine plasma cutting of advanced aerospace materials // Journal of Materials Processing Technology. 1995. Vol. 48. P. 825 – 831.
6. Nedic B., Jankovic M., Radovanovic M. Quality of plasma cutting. – In: 13th International Conference on Tribology, SERBIATRIB '13. Kragujevac, Serbia, 15-17 May 2013. – Kragujevac, Serbia, 2013. P. 314 – 319.
7. Anakhov S.V., Singer K., Pykin Yu.A., Shakurov S.A. Examination of the cut surface in thermal cutting of 09G2S steel // Welding International. 2008. Vol. 22. No. 4. P. 267 – 270.
8. Чередниченко В.С., Аньшаков А.С., Кузьмин М.Г. Плазменные электротехнологические установки. – Новосибирск: изд. НГТУ, 2011. – 602 с.
9. Чику Куанг Фи. Исследование эффективности технологии узкоструйной плазменной резки металлов: автореф. дис... канд. техн. наук: 05.08.04. – СПб., 2008. – 27 с.
10. Лашенко Г.И. Плазменная резка металлов и сплавов. – Киев: Эко-технология, 2003. – 64 с.
11. Bhuvenesh R., Norizaman M.H., Abdul Manan M.S. Surface roughness and MRR effect on manual plasma arc cutting machining // International Journal of Industrial and Manufacturing Engineering. 2012. Vol. 6. No. 2. P. 459 – 462.
12. Остриков О.М., Кузнецова О.С. Влияние режимов плазменной резки на микроструктуру, микротвердость и качество обработки углеродистых сталей // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. 2010. № 1 (40). С. 33 – 38.
13. Гаар Н.П., Рахимьянов А.Х., Локтионов А.А. Предотвращение дефектов реза за счет оптимизации траектории при тонкоструйной плазменной резке // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2018. № 2. С. 70 – 75.
14. Дресвин С.В., Зверев С.Г. Плазматроны: конструкции, параметры, технологии. – СПб.: изд. Политехн. ун-та, 2007. – 208 с.
15. Tendero C., Tixier C., Tristant P., Desmaison J., Leprince P. Atmospheric pressure plasmas: a review // Spectrochim Acta. Part B. 2006. No. 61. P. 2 – 29.
16. Xiuquan Cao, Deping Yu, Meng Xiao, Jianguo Miao, Yong Xiang, Jin Yao. Design and characteristics of a laminar plasma torch for materials processing // Plasma Chemistry and Plasma Processing. 2016. No. 36. P. 693 – 710.
17. Пат. 2584367 RU. Плазматрон / Пыкин Ю.А., Анахов С.В., Матушкин А.В.; заявл. 11.03.2015; опубл. 20.05.2016. Бюл. № 14.
18. Шалимов М.П., Анахов С.В., Пыкин Ю.А., Матушкин А.В., Матушкина И.Ю. Оценка эффективности газовихревой стабилизации в плазматронах для резки металлов // Сварка и диагностика. 2018. № 2. С. 57 – 61.
19. Matushkin A.V., Pykin Yu.A., Anakhov S.V., Matushkin I.Y. About raising of the gas vortex stabilization efficiency in plasma torch for metal cutting // Solid State Phenomena. 2018. Vol. 284. P. 218 – 223.
20. Михайлицын С.В., Шекшеев М.А., Аюбашев О.М. и др. Исследование плазменно-дуговой резки низколегированной стали 09Г2С // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2017. Т. 15. № 2. С. 48 – 52.
21. Mostaghimi J., Boulos M.I. Thermal plasma sources: how well are they adopted to process needs? // Plasma Chemistry and Plasma Processing. 2015. No. 35. P. 421 – 436.
22. Vardelle A., Moreau C., Themelis N.J., Chazelas C. A perspective on plasma spray technology // Plasma Chemistry and Plasma Processing. 2015. No. 35. P. 491 – 509.
23. Venkataramani N. Industrial plasma torches and applications // Current Science. 2002. Vol. 83. No. 3. P. 254 – 262.

Поступила в редакцию 20 ноября 2019 г.
После доработки 2 декабря 2019 г.
Принята к публикации 3 декабря 2019 г.

INFLUENCE OF PLASMA TORCH DESIGN ON CUTTING QUALITY DURING PRECISION AIR-PLASMA CUTTING OF METAL

*S.V. Anakhov¹, B.N. Guzanov¹, A.V. Matushkin²,
N.B. Pugacheva³, Yu.A. Pykin⁴*

¹ Russian State Professional Pedagogical University, Ekaterinburg, Russia

² Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

³ Institute of Engineering Science, RAS (Ural Branch), Ekaterinburg, Russia

⁴ Ural State Forest Engineering University, Ekaterinburg, Russia

Abstract. Optical interferometry and metallographic analysis were used to study structure of cutting seams obtained after 09G2S steel cutting by PMVR-5 plasma torch. These plasma torches have a number of design features in the system of gas-dynamic stabilization of plasma arc. It is shown that application of new plasma torch allows obtaining higher quality of cutting 09G2S steel of medium thickness with high productivity and lower energy costs. Metallographic analysis has shown that qualitative composition of the cut surface structure is almost the same, so priority criteria for comparative quality analysis are parameters of surface microgeometry. Evaluation of this parameter shows high qua-

lity of cutting almost along the entire length of a cut, since the influence of technological features of plasma arc cut into the metal affects at a distance of less than 0.3 mm from the edge of the sheet. The use of additional methods of gas-dynamic stabilization in PMVR -5.2 plasma torch (feed symmetry with a double swirl system of plasma-forming gas) allows to achieve additional advantages in terms of surface quality compared to PMVR -5.1. A number of features that affects quality of cut when cutting metals of different thicknesses for welding, is noted depending on the angle of inclination of plasma torch during cutting. Estimates of the surface layer hardness indicate minimal deviations from the requirements of GAZPROM Standard 2-2.4-083 (instructions on welding technologies in the construction and repair of field and main gas pipelines), which allows further use of cutting seams obtained by studied plasma torches for welding without removing zones of thermal influence. Thus, application of new plasma torches makes possible precision finishing plasma cutting of metals, including production of welded joints.

Keywords: plasma torch, design, welding seams, heat-affected zone, structure transformation, defects, quality, efficiency.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-2-155-162

REFERENCES

- Nikou V. *Welded repair and maintenance in the space environment*. Massachusetts Institute of Technology, 2003, 113. p.
- Kaidalov A.A. *Sovremennye tekhnologii termicheskoi i distantsionnoi rezki konstruktsionnykh materialov* [Modern technologies for thermal and remote cutting of structural materials]. Kiev: Ekotekhnologiya, 2007, 456 p. (In Russ.).
- Kavun N.N., Gusev V.G. Comparative analysis of cutting methods for sheet material. In: *Perspektivy razvitiya tekhnologii i oborudovaniya v mashinostroenii* [Prospects of technologies and equipment in mechanical engineering]. Gorokhov A.A. ed. Kursk: Universitetskaya kniga, 2016, pp. 50–53. (In Russ.).
- Esibyan E.M. Air-plasma cutting: state and prospects. *Avtomaticheskaya svarka*. 2000, no. 12, pp. 6–16. (In Russ.).
- Hoult A.P., Pashby I.R., Chan K. Fine plasma cutting of advanced aerospace materials. *Journal of Materials Processing Technology*. 1995, vol. 48, pp. 825–831.
- Nedic B., Jankovic M., Radovanovic M. Quality of plasma cutting. In: *13th Int. Conf. on Tribology, SERBIATRIB '13. Kragujevac, Serbia, 15-17 May 2013*, pp. 314–319.
- Anakhov S.V., Singer K., Pykin Yu.A., Shakurov S.A. Examination of the cut surface in thermal cutting of 09G2S steel. *Welding International*. 2008, vol. 22, no. 4, pp. 267–270.
- Cherednichenko V.S., An'shakov A.S., Kuz'min M.G. *Plazmennye elektrotekhnologicheskie ustanovki* [Plasma electrotechnological installations]. Novosibirsk: NGTU, 2011, 602 p. (In Russ.).
- Chieu Kuang Fi. *Issledovanie effektivnosti tekhnologii uzkostruinoi plazmennoi rezki metallov: avtoref. dis... kand. tekhn. nauk: 05.08.04* [Feasibility study of narrow-jet plasma cutting of metals: Extended Abstract of Cand. Sci. Diss.]. St. Petersburg, 2008, 27 p. (In Russ.).
- Lashchenko G.I. *Plazmennaya rezka metallov i splavov* [Plasma cutting of metals and alloys]. Kiev: Ekotekhnologiya, 2003, 64 p. (In Russ.).
- Bhuvnesh R., Norizaman M.H., Abdul Manan M.S. Surface roughness and MRR effect on manual plasma arc cutting machining. *International Journal of Industrial and Manufacturing Engineering*. 2012, vol. 6, no. 2, pp. 459–462.
- Ostrikov O.M., Kuznetsova O.S. Influence of plasma cutting modes on microstructure, microhardness and processing quality of carbon steels. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. P.O. Sukhogo*. 2010, no. 1 (40), pp. 33–38. (In Russ.).
- Gaar N.P., Rakhimyanov A.Kh., Loktionov A.A. Prevention of cut defects by optimizing trajectory for fine-jet plasma cutting. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2018, no. 2, pp. 70–75. (In Russ.).
- Dresvin S.V., Zverev S.G. *Plazmotrony: konstruksii, parametry, tekhnologii* [Plasmatrons: designs, parameters, technologies]. St. Petersburg: izd. Politekh. un-ta, 2007, 208 p. (In Russ.).
- Tendero C., Tixier C., Tristant P., Desmaison J., Leprince P. Atmospheric pressure plasmas: A review. *Spectrochim Acta. Part B*. 2006, no. 61, pp. 2–29.
- Xiuquan Cao, Deping Yu, Meng Xiao, Jianguo Miao, Yong Xiang, Jin Yao. Design and characteristics of a laminar plasma torch for materials processing. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 2016, no. 36, pp. 693–710.
- Pykin Yu.A., Anakhov S.V., Matushkin A.V. *Plazmotron* [Plasma torch]. Patent RF no. 2584367. *Bulleten' izobretenii*. 2016, no. 14. (In Russ.).
- Shalimov M.P., Anakhov S.V., Pykin Yu.A., Matushkin A.V., Matushkina I.Yu. Evaluation of effectiveness of gas-vortex stabilization in plasma torch for metal cutting. *Svarka i diagnostika*. 2018, no. 2, pp. 57–61. (In Russ.).
- 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.
- Mikhailitsyn S.V., Shekshhev M.A., Ayubashev O.M. etc. Plasma arc cutting of 09G2S low alloy steel. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova*. 2017, vol. 15, no. 2, pp. 48–52. (In Russ.).
- Mostaghimi J., Boulos M.I. Thermal plasma sources: how well are they adopted to process needs? *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 2015, no. 35, pp. 421–436.
- Vardelle A., Moreau C., Themelis N.J., Chazelas C. A perspective on plasma spray technology. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 2015, no. 35, pp. 491–509.
- Venkataramani N. Industrial plasma torches and applications. *Current Science*. 2002, vol. 83, no. 3, pp. 254–262.

Information about the authors:

S.V. Anakhov, Cand. Sci. (Phys.–Math.), Head of the Chair of *Mathematic and Natural Sciences* (sergej.anahov@rsvpu.ru)

B.N. Guzanov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair of *Engineering and Vocational Training in Machinery and Metallurgy* (boris.guzanov@rsvpu.ru)

A.V. Matushkin, Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of the Chair *“Welding Technology”* (227433@yandex.ru)

N.B. Pugacheva, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher of the *Laboratory of Materials Micromechanics* (nat@imach.uran.ru)

Yu.A. Pykin, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of *Physical and Chemical Technologies in Biosphere Protection* (yappoligon@mail.ru)

Received November 20, 2019

Revised December 2, 2019

Accepted December 3, 2019