

DOI: 10.15593/2224-9877/2017.2.12

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

КВАЛИМЕТРИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЛАЗМОТРОНОВ ДЛЯ РЕЗКИ МЕТАЛЛОВ

Сравнительный анализ, произведенный по отдельным технологическим характеристикам, показывает, что современные отечественные плазматроны для резки металлов уступают продукции ведущих зарубежных изготовителей по показателям производительности, энергоэффективности, качества и даже безопасности процесса. С целью преодоления упомянутого отставания были проведены исследования по систематизации существующих на данный момент принципов проектирования плазматронов для резки металлов. По результатам данных исследований были сформулированы методы проектирования, улучшающие параметры работы плазморезательного оборудования, и разработаны новые плазматроны (ПМВР-2М, ПМВР-3, ПМВР-5) с более эффективными показателями производительности, качества и безопасности резки. Появление нового оборудования требует экспериментального обоснования эффективности его работы по сравнению как с ранее производимыми аналогами, так и с современными отечественными и зарубежными образцами. Для анализа эффективности работы плазматронов взят технологический регламент испытания параметров качества и безопасности технологии плазменно-дуговой резки металлов, предложенный авторами. Проведены также исследования механических свойств сварных швов, полученных после резки стали 09Г2С механическим способом и плазматронами различных модификаций. Для интегральной оценки полученных результатов предложено использовать методы квалиметрического анализа, адаптированные к технологии плазменной резки. Представлены количественные значения сравниваемых параметрических величин и соответствующих им квалиметрических показателей. Полученные интегральные показатели свидетельствуют об эффективности работы новых плазматронов, спроектированных авторами. При этом эффективность нового однопоточного плазмотрона оказалась в два раза более высокой, чем у базового отечественного аналога, и сопоставима с показателями однотипного импортного плазмотрона. Еще более эффективной оказалась разработанная авторами конструкция плазмотрона, работающего по технологии узкоструйной плазмы.

Ключевые слова: плазмотрон, проектирование, сварной шов, зона термического влияния, ударная вязкость, статический изгиб, разрушение, качество, эффективность.

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. Yeltsin,
Ekaterinburg, Russian Federation

QUALIMETRIC ESTIMATION OF DESIGNING EFFICIENCY FOR METAL CUTTING PLASMATRONS

The comparative analysis executed on separate technical characteristics, shows, that modern domestic plasmotrons for metal cutting concede to production of leading foreign manufacturers on parameters of productivity, energy efficiency, qualities and even safety of process. With the purpose of the mentioned backlog overcoming the researches on ordering of existing designing principles for metal cutting plasmotrons have been carried out. By the results of this researches methods of designing improving operational parameters of plasma cutting equipment have been formulated. Also new plasmotrons (PMVR-2M, PMVR-3, PMVR-5) with more effective parameters of productivity, quality and safety were developed. Occurrence of the new equipment demands an experimental substantiation of its work efficiency in comparison, both with earlier made analogues, and with modern domestic and foreign samples. For the analysis of an overall performance of plasmatron the test schedules of quality and safety parameters in plasma-arc metal cutting technology, offered by authors in work, was taken into account. Also researches of mechanical properties of the welded seams received after O9Г2C steel cutting mechanically and by various plasmotrons are carried out. For an integrated estimation of the received results it is offered to use methods of analysis, adapted for plasma cutting technology. Quantitative values of compared parametrical sizes and corresponding to them qualimetric parameters are presented. The received integrated parameters testify to an overall performance of new plasmotrons, designed by authors. Thus efficiency of new one-flow plasmatron has appeared in 2 times of higher, than at base domestic analogue and is comparable to parameters same import plasmatron. Even more effective the construction of developed by authors plasmatron, working by narrow-jet plasma technology, has appeared.

Keywords: plasmatron, design, welding seems, heat-affected zone, impact elasticity, static curve, destruction, quality, efficiency.

Плазматроны – один из наиболее эффективных инструментов в технологиях резки металлов. Несмотря на постепенное расширение сферы применения альтернативных способов термической резки, плазмотрон остается фактически незаменимым при резке металлов средних толщин (в том числе под сварку), разделке металлопроката и т.д. Разработанные еще в советские годы принципы проектирования плазморезательного оборудования [1, 2] позволяют и в настоящее время выпускать достаточно производительные плазматроны [3, 4], однако появление с начала 2000-х гг. широкого спектра импортного оборудования сделало вопрос определения конкурентных преимуществ одним из ключевых при выборе конкретной плазменной технологии.

Сравнительный анализ, произведенный по отдельным технологическим характеристикам, показывает, что современные отечественные плазмотроны для резки металлов уступают продукции ведущих зарубежных изготовителей по показателям производительности, энергоэффективности, качества и даже безопасности процесса. Особо следует отметить фактическое отсутствие на отечественном рынке плазмотронов, работающих по технологии узкоструйной плазмы. Подобная технология, называемая также «точной» или «сжатой плазмой», появилась у зарубежных производителей (Kjelberg, HyperTherm, MesserGreisheim) в 2005–2010 гг. и позволила поднять плазменную резку на новый уровень качества, эффективности и безопасности, сделав ее фактическим конкурентом лазерной резке металлов малых толщин.

С целью преодоления упомянутого отставания авторами данной публикации были проведены исследования по систематизации существующих на данный момент принципов проектирования плазмотронов для резки металлов [5]. По результатам данных исследований были сформулированы методы проектирования, улучшающие параметры работы плазморезательного оборудования, и разработаны новые плазмотроны (ПМВР-2М, ПМВР-3) с более эффективными показателями по производительности, качеству и безопасности резки [6]. Отдельно выделим разработку серии плазмотронов ПМВР-5 для механизированной воздушной плазменной резки, работающих по технологии узкоструйной плазмы.

Появление нового оборудования требует экспериментального обоснования эффективности его работы по сравнению как с ранее производимыми аналогами, так и с современными отечественными и зарубежными образцами. В этой связи встает вопрос об определении набора сравнительных технологических параметров, а также выборе методов, средств и объема необходимых для их определения испытаний. При этом следует учесть, что, помимо соблюдения необходимых сертификационных требований (соответствия ГОСТам и СНИПам), возникают потребности обоснования конкурентных преимуществ по достаточно широкому спектру потребительских и технологических характеристик. Последнее требование существенно увеличивает объем и, соответственно, стоимость достаточно непростых экспериментальных исследований и заставляет производить сравнение большого числа как отечественных, так и импортных образцов оборудования.

При выборе критериев для оценки эффективности разработанных в авторском коллективе плазмотронов был произведен анализ большого числа параметров, характеризующих работу современных плазмотронов, произведенных различными изготовителями [5]. Как выяснилось, количество демонстрируемых производителями показателей существенно меньше числа критериев, нормируемых стандартами, причем сравнение со стандартами производится в достаточно редких случаях без ссылок на экспериментальные методики. Кроме того, в настоящее время фактически отсутствует регламент, обеспечивающий процедуру комплексного исследования результативности проектирования по критериям эффективности и методика сравнительного интегрального анализа плазмотронов.

Для анализа эффективности работы плазмотронов был взят технологический регламент испытания параметров качества и безопасности технологии плазменно-дуговой резки металлов, предложенный авторами в работе [5]. Данный регламент предусматривает трехстадийную методику исследований, включающую в себя технологические испытания плазмотронов, экспериментальные исследования качества разделительной резки (включая дополнительные исследования сварных швов, полученных после плазменной резки) и факторов безопасности в рабочей зоне плазменной резки. При этом целью первой стадии исследований является отбор плазмотронов по типам, вольт-амперным характеристикам, заявленным скоростям резки и толщинам разрезаемых металлов в соответствии с заводской номенклатурой и требованиями технологии, а также определение оптимальных и предельных параметров процесса. В качестве основных параметров сравнения на этой стадии следует выбрать производительность (1П – скорость резки) и энергоэффективность (1Э – потребляемую мощность). На второй стадии после пробоподготовки, изготовления образцов и подготовки поверхности (удаления окалины, химической очистки и т.д.) определяются параметры качества резки металлов и характеристики сварных швов, полученных после плазменной резки под сварку. На третьей стадии испытаний основное внимание уделяется исследованию параметров безопасности плазменной резки. Разумеется, испытания должны происходить при одинаковых условиях (резке металлов одинакового сортамента, толщины и т.д.).

Исследования параметров качества плазменной резки

Исследование образцов после плазменной резки		Исследование образцов после сварки (дополнительные)	
1К	Перпендикулярность кромки реза	1КС	Твердость металла шва, ЗТВ (НВ, НR, НV)
2К	Шероховатость поверхности кромки	2КС	Микротвердость структурных составляющих металла шва, ЗТВ (НV)
3К	Отклонения размеров от номинальных (точность реза)	3КС	Испытания на ударную вязкость металла шва, ЗТВ при разных температурах (KCV)
4К	Твердость поверхности кромки реза в верхнем, среднем и нижнем слое (НВ, НR, НV)	4КС	Испытания на растяжение металла шва, ЗТВ при разных температурах
5К	Толщина слоя окалины	5КС	Исследование структуры металла шва, ЗТВ
6К	Глубина зоны термического влияния (ЗТВ)	6КС	Исследование состава металла шва
7К	Величина газового насыщения поверхностного слоя металла	7КС	Испытание на статический изгиб
8К	Структура металла в ЗТВ		
9К	Остаточные продукты резки		

Исследование параметров безопасности плазменной резки

1Б	Уровень звука, уровень звуковой мощности, спектральные характеристики шума в звуковой и ультразвуковой областях излучения, диаграмма направленности
2Б	Электромагнитное излучение (напряженность ЭМ-поля, индукция магнитного поля, плотности потока энергии, яркость, освещенность)
3Б	Температурный режим
4Б	Пылегазовыделение

Для интегральной оценки полученных результатов можно использовать методы квалиметрического анализа [7], адаптированные к технологии плазменной резки [5]. В основе формализации определения эффективности в этом случае используют понятие абсолютного показателя свойства Q_i ($i = 1, 2, \dots, n$), выраженного в характерных для

отдельного свойства единицах измерения (глубина ЗТВ – в микронах, скорость резки – в метрах в секунду и т.д.). Если критерием является соответствие или несоответствие какого-либо свойства показателям ГОСТа, можно использовать значения величин $Q = 1$ или $Q = 0$. В случае сравнительного анализа различных свойств, измеряемых в разных по размаху и размерности шкалах, используется относительный безразмерный показатель K_i (от -1 до $+1$), отражающий степень приближения абсолютного показателя свойства Q_i к среднему значению для рассматриваемого свойства (параметра) $\langle Q_i \rangle$:

$$K_i = (Q_i - \langle Q_i \rangle) / Q_m,$$

$$\langle Q_i \rangle = (\max\{Q_i\} + \min\{Q_i\}) / 2,$$

$$Q_m = (\max\{Q_i\} - \min\{Q_i\}) / 2,$$

где $\max\{Q_i\}$ и $\min\{Q_i\}$ – максимальное и минимальное значения числового показателя Q_i для рассматриваемого свойства.

В результате свойство с наименьшим значением Q_i будет характеризоваться значением $K_i = -1$, а для наибольшего Q_i $K_i = +1$. Очевидно, что различные показатели могут иметь разную значимость как для конкретного потребителя, так и для конкретной технологии. В этой связи дополнительно задаются весовые коэффициенты G_i , определяющие относительную «важность» i -го свойства по единой для всех свойств шкале. Обычно для этих целей используются нормированные весовые коэффициенты $H_i = G_i / \sum G_i$, меняющиеся в пределах от 0 (для неважных свойств) до 1 (для важного свойства). Следует также задать знак S_i (положительный или отрицательный), определяющий вклад каждого из свойств в суммарную эффективность устройства. Например, показатель глубины ЗТВ должен иметь отрицательный знак: чем он больше, тем хуже качество реза данным плазмотроном и, как правило, хуже свойства получаемых в дальнейшем сварных швов. Для нормировки коэффициентов в диапазоне от 0 до 1 вводят дополнительный коэффициент L_i , определяемый через K_i простым арифметическим сдвигом:

$$L_i = \frac{S_i K_i + 1}{2}.$$

С учетом всех сделанных определений интегральный показатель эффективности можно представить в виде некоторой функции $L = F(L_i)$, которая, как правило, задается суммой вида

$$L = \sum H_i L_i.$$

Следует обратить внимание на то, что при сравнении отдельных параметров безопасности могут возникнуть сложности, связанные с тем, что эти показатели зачастую нормируются в различных спектральных диапазонах (для электромагнитного и акустического излучения) и имеют логарифмический диапазон величин (для акустических характеристик). В этом случае предпочтительно сравнивать интегральные характеристики (энергетическую освещенность, экспозиционную дозу), а для акустических характеристик сравнивать звуковые мощности P :

$$K_i = \frac{P_i - \langle P \rangle}{P_m},$$

$$P_i = 10^{0,1L_i}, \quad \langle P \rangle = \frac{10^{0,1L_{\max}} + 10^{0,1L_{\min}}}{2}, \quad P_m = \frac{10^{0,1L_{\max}} - 10^{0,1L_{\min}}}{2},$$

где P_i и L_i – звуковая мощность и уровень звука i -го плазмотрона.

Кроме того, следует учесть, что отдельные параметры сравнения могут иметь несколько форм выражения (например, уровень звука или уровень звуковой мощности – для акустического излучения) и определяться при разных условиях, например на прямых и косых резах (шероховатость) или глубинах (твердость). В такой ситуации, очевидно, многое будет зависеть от предъявляемых к оценке требований большей или меньшей детализации сравнительных характеристик с последующим выбором соответствующих весовых характеристик H_i для каждого отдельного параметра либо их усреднения.

Описанный метод квалиметрического анализа был применен для оценки сравнительной эффективности результатов проектирования и разработки новых плазмотронов для резки металлов. Для сравнения были выбраны следующие плазмотроны (рисунок):

– ПМВР-М – базовый однопоточный плазмотрон (производитель ООО НПО «Полигон», разработка начала 2000-х гг.);

– Kjellberg PB-S-45W (Германия) – однопоточный плазмотрон одного из ведущих мировых производителей;

– ПМВР-2М – новый однопоточный плазмотрон для воздушно-плазменной резки с оптимизированной системой газовихревой стабилизации (производители – ООО НПО «Полигон» и ООО «ТЕРУС») [8, 9];

– ПМВР-5.3 – одна из модификаций отечественной модели узкоструйного двухпоточного плазмотрона (производители – ООО НПО «Полигон» и ООО «ТЕРУС»).



Рис. 1. Внешний вид плазмотронов для резки металла под сварку: а – ПМВР-М; б – Kjellberg PB-S-45W; в – ПМВР-2М; г – ПМВР-5.3

На первом этапе испытаний в лаборатории ООО НПО «Полигон» определяли оптимальные и предельные параметры процесса при резке стали 09Г2С толщиной 10 мм (табл. 1).

Таблица 1

Режимы резки образцов

Но- мер се- рии	Плазмотрон	Режим резки				
		Диаметр сопла, мм	I , А	U , В	Скорость резки v , м/мин	Давление плазмообра- зующего газа (ПОГ) на входе в плазмотрон P , МПа
1	ПМВР-М	2,5	105	200	0,54	0,45
2	Kjellberg S-45	1,4	90	140	0,85	0,5
3	ПМВР-2М	2	80	180	0,5	0,5
4	ПМВР-5.3	1,6	90	140	1,3	0,5

На втором этапе при анализе качественных параметров кромок поверхностей реза в соответствии с требованиями ГОСТ 14792 и DIN EN ISO 9013–2003 оценивались следующие основные параметры:

- отклонение от перпендикулярности;
- радиус оплавления верхней кромки;
- шероховатость поверхности реза.

Дополнительно выполнялась оценка:

- глубины зоны термического влияния;
- глубины слоя оплавления;
- изменения микро- и макроструктуры ЗТВ;
- изменения твердости от кромки реза до основного металла, не подверженного структурным изменениям.

Измерения проводились в лабораториях Свердловского государственного технического университета и ИМАШ УрО РАН как для перпендикулярного реза, так и для реза, выполненного под углом. По результатам исследований качества резов, выполненных новыми плазматронами [9, 10], можно сделать вывод, что отклонение от перпендикулярности соответствует 1-му и 2-му классам качества по ГОСТ 14792–80. При этом угловые значения косых резов соответствуют требованиям СТО «Газпром» 2-2.2-136–2007. Результаты исследований рельефа свидетельствуют о средних значениях шероховатости в 3–7 мкм, что соответствует 1-му классу качества по ГОСТ 14792–80. Все исследованные поверхности разделочных швов, полученных после резки, по микроструктуре удовлетворяют нормативным требованиям, предъявляемым к стали марки 09Г2С. Исследования твердости показали небольшое отклонение от требований СТО «Газпром» 2-2.4-083 ($HV \leq 300$ для ЗТВ), наблюдаемое лишь в поверхностной зоне на глубинах менее 100–150 мкм, что позволяет при дальнейшем использовании полученных после резки швов под сварку не производить дополнительные операции по ее механическому удалению. В результате можно сделать вывод, что качество реза плазматронами ПМВР-5 и ПМВР-2М находится на уровне верхнего предела 1-го класса качества по ГОСТ 14792–80 и сопоставимо с лазерной резкой на толщинах до 15 мм.

Следующим этапом исследований стало проведение механических испытаний сварных швов, полученных из заготовок, подготовленных в процессе резки плазматронами и механическим способом. В ходе исследований, проведенных в лабораториях ПАО УЗТМ и ИМАШ УрО РАН, определялись следующие основные параметры:

- статическое растяжение различных участков сварного соединения и наплавленного металла;
- ударный изгиб (на надрезанных образцах) различных участков сварного соединения и наплавленного металла;
- статический изгиб (загиб) сварного соединения;
- твердость различных участков сварного соединения и наплавленного металла.

Также проводился микро- и макроанализ сварных швов.

Анализ полученных результатов [11–13] показал, что все исследованные сварные швы по микроструктуре удовлетворяют нормативным требованиям, предъявляемым к стали марки 09Г2С. Показатели прочности и пластичности сварных швов, полученных после разделки проката с применением плазменных методов без удаления ЗТВ, удовлетворяют нормативным требованиям, предъявляемым к сварным соединениям и, в случае применения новых (ПМВР-2М и ПМВР-5.3) плазмотронов, сопоставимы со значениями, достигаемыми при подготовке кромок под сварку механическим способом. Исследования на статический изгиб показали отсутствие значимых различий в величинах определяемого по ГОСТ 6996 угла загиба для различных серий образцов, значения которого не превышают нормативных требований ($\alpha_{\min} \geq 80^\circ$ по стандарту ПБ 03-576–03). Ударная вязкость всех сварных швов удовлетворяет нормативным требованиям на низколегированную сталь по ГОСТ 19282–73. Твердость всех исследованных образцов соответствует требованиям СТО «Газпром» 2-2.2-136–2007 ($HV_{10} \leq 280$ для металла шва и $HV_{10} \leq 300$ для ЗТВ). При этом можно сделать вывод, что механические свойства сварных швов, полученных после резки плазмотронами ПМВР-2М и ПМВР-5.3, сопоставимы со значениями, характерными для механических технологий разделки. Другим важным результатом исследования механических свойств сварных соединений является заключение о том, что сварку после резки металла современными плазмотронами в большинстве случаев можно производить без механической обработки кромок реза (за исключением ответственных соединений, производство которых регламентируется правилами промышленной безопасности).

Последним этапом исследований стало определение параметров безопасности процесса плазменной резки. В качестве основных показателей в этом случае были выбраны:

- уровень звука и звуковой мощности в слышимом диапазоне акустического спектра;
- уровень звуковой мощности в ультразвуковом диапазоне;
- уровень освещенности на рабочем месте.

Анализ полученных результатов засвидетельствовал повышенную акустическую безопасность плазмотрона ПМВР – снижение шумоизлучения на 3–7 дБА [14], что позволяет увеличить на 2–3 ч диапазон допустимого времени работы плазморезчика, а также существенно (на 50 лк) уменьшить уровень светового излучения, производимого на рабочем месте при работе плазмотронов ПМВР-2М и ПМВР-5.3. При этом уровень звуковой мощности, излучаемой в ультразвуковом диапазоне, для всех плазмотронов оказался в пределах нормируемых для данной части акустического спектра значений.

Несмотря на качественно положительную оценку эффективности работы новых плазмотронов, целесообразно произвести комплексную (интегральную) оценку их преимуществ по сравнению как со старыми аналогами (ПМВР-М), так и с конкурентными образцами зарубежных производителей (Kjellberg S-45). Подобный анализ был выполнен по описанной выше методике квалиметрической оценки эффективности. С учетом того, что в большинстве случаев было зафиксировано соответствие показателям ГОСТов, а различие некоторых результатов оказалось в пределах погрешности измерений, отдельные параметры были исключены из анализа, а для других показателей, где качественные различия были наиболее существенны, были введены соответствующие весовые коэффициенты. Кроме того, некоторые из перечисленных выше показателей были представлены несколькими характеристиками. В этом случае также были введены соответствующие весовые коэффициенты с учетом требования sobлюсти характерное для данного показателя суммарное весовое значение. Для параметров, измеряемых на прямых и косых резах, а также в зонах сварного шва и ЗТВ, определялось среднее значение. Количественные значения абсолютных параметрических величин и соответствующих им квалиметрических показателей представлены в табл. 2–6.

Таблица 2

Квалиметрическая таблица оценки производительности и энергоэффективности и качества работы плазматронов для резки металлов

№ п/п	Параметр	H_i	S_i	Единица измерения [значение по ГОСТ]/коэффициент эффективности L_i	Плазматрон			
					ПМВР-М	Kjellberg S-45	ПМВР-2М	ПМВР-5.3
Производительность								
1	1П	1	+	скорость резки (м/с)	0,54	0,85	0,54	1,30
				$L_1 =$	0	0,41	0	1
Энергоэффективность								
2	1Э	1	-	энергопотребление (кВт)	21	12,6	14,5	12,6
				$L_2 =$	0	1	0,77	1
Интегральный коэффициент качества сварных швов после плазменной резки				$L_{пЭ} = \sum_{i=1}^2 H_i L_i =$	0	1,41	0,77	2,0

Таблица 3

Квалиметрическая таблица оценки качества плазменной резки металлов

№ п/п	Параметр	H_i	S_i	Единица измерения [значение по ГОСТ]/коэффициент эффективности L_i	Плазматрон			
					ПМВР-М	Kjellberg S-45	ПМВР-2М	ПМВР-5.3
1	2К	0,75	-	шероховатость Rz (мкм) [<50 (1 кл)]	6,7	7,2	7,6	4,2
				$L_1 =$	0,26	0,12	0	1
2	3К ₁	0,75	-	перпендикулярность кромки реза (град) [<5,7 (1 кл)]	6,8	5,0	4,5	2,0
				$L_2 =$	0	0,43	0,49	1

Окончание табл. 3

№ п/п	Параметр	H_i	S_i	Единица измерения [значение по ГОСТ]/коэффициент эффективности L_i	Плазмотрон			
					ПМВР-М	Kjellberg S-45	ПМВР-2М	ПМВР-5.3
3	3К ₂	0,25	-	радиус оплавления верхней кромки реза (мм) [<2]	1,0	0,7	1,0	0,7
				$L_3 =$	0	1	0	1
4	5К	0,75	-	глубина зоны окалины (мкм)	18,5	н/д	8,8	н/д
				$L_4 =$	0	-	1	-
5	6К	1	-	глубина ЗТВ (мкм) [<800 (2 кл)]	790	н/д	710	500
				$L_5 =$	0	-	0,28	1
Интегральный коэффициент эффективности и качества резки				$L_{кр} = \sum_{i=1}^3 H_i L_i =$	0,2	0,67	0,48	1,75
				$(L_{кр}) = \sum_{i=1}^5 H_i L_i =$	(0,2)	-	(1,4)	(2,75)

Таблица 4

Квалиметрическая таблица оценки качества сварных швов,
полученных после плазменной резки

№ п/п	Параметр	H_i	S_i	Единица измерения [значение по ГОСТ]/коэффициент эффективности L_i	Плазмотрон			
					ПМВР-М	Kjellberg S-45	ПМВР-2М	ПМВР-5.3
1	2КС	0,5	-	ширина шва (мм) [<14]	12	11	14	12
				$L_1 =$	0,67	1	0	0,67
2	3КС ₁	0,5	+	ударная вязкость KCV (Дж/см ²) [64 (ОМ*)]	165	145	125	145
				$L_2 =$	1	0,5	0	0,5

Окончание табл. 4

№ п/п	Параметр	H_i	S_i	Единица измерения [значение по ГОСТ]/коэффициент эффективности L_i	Плазмотрон			
					ПМВР-М	Kjellberg S-45	ПМВР-2М	ПМВР-5.3
3	3КС ₂	0,5	+	доля вязкой составляющей ϵ (%)	70	65	75	70
				$L_3 =$	0,5	0	1	0,5
4	4КС ₁	0,25	+	временное сопротивление разрыву σ_B (МПа) [480 (ОМ)]	462	478	563	555
				$L_4 =$	0	0,22	1	0,93
5	4КС ₂	0,25	+	предел текучести условный σ_T (МПа) [335 (ОМ)]	307	298	437	418
				$L_5 =$	0,06	0	1	0,86
6	4КС ₃	0,25	+	относительное удлинение δ (%) [21 (ОМ)]	11,3	6,4	10,8	10,5
				$L_6 =$	1	0	0,9	0,84
7	4КС ₄	0,25	+	равномерное удлинение δ (%)	10,7	6,2	10,0	9,6
				$L_7 =$	1	0	0,84	0,76
8	7КС	0,25	+	статический изгиб α (град) [80 (ОМ)]	94	93,8	92,3	92,3
				$L_8 =$	1	0,88	0	0
Интегральный коэффициент качества сварных швов после плазменной резки				$L_{КС} = \sum_{i=1}^8 H_i L_i =$	1,85	1,03	1,44	1,68

*ОМ – основной металл (характеристика сравнивается с нормируемым значением для основного металла).

Таблица 5

Квалиметрическая таблица оценки безопасности работы плазмотронов
для резки металлов

№ п/п	Пара- метр	H_i	S_i	Единица измерения [значение по ГОСТ]/коэффициент эффективности L_i	Плазмотрон			
					ПМВР-М	Кjellberg S-45	ПМВР-2М	ПМВР-5.3
1	1Б ₁	0,75	–	уровень звука L_A в диапазоне до 8 кГц (дБА) [<80]	103,3	97,4	103,0	94,9
				$L_1 =$	0	0,87	0,46	1
2	1Б ₂	0,25	–	уровень звуковой мощности L_m в ультразвуковом диапазоне (дБ) [<118]	109,9	111,1	110,8	106,2
				$L_2 =$	0,36	0	0,1	1
3	2Б	0,5	–	освещенность рабочей зоны (лк)	300	300	250	250
				$L_3 =$	0	0	1	1
Интегральный коэффициент безопасности резки				$L_B = \sum_{i=1}^3 H_i L_i =$	0,09	0,65	0,87	1,5

Таблица 6

Квалиметрическая таблица интегральной оценки эффективности
работы плазмотронов для резки металлов

Плазмотрон	Интегральный коэффициент эффективности резки	
	$L = L_{ПЭ} + L_{КР} + L_{КС} + L_B$	$(L) = L_{ПЭ} + (L_{КР}) + L_{КС} + L_B$
ПМВР-М	2,14	(2,14)
Кjellberg S-45	3,75	–
ПМВР-2М	3,43	(4,46)
ПМВР-5.3	6,93	(7,93)

Представленные в табл. 2–6 результаты свидетельствуют об эффективности работы новых плазмотронов. Новый плазмотрон ПМВР-2М по сравнению с базовым аналогом – плазмотроном ПМВР-М – показал фактически двукратное улучшение как по величине интегрального коэффициента эффективности, так и по качеству резки, безопасности и энергоэффективности. При этом суммарные показатели его эффективности оказались сопоставимы с показателями одной из самых популярных импортных моделей однопоточных плазмотронов – Kjellberg S-45, что свидетельствует о тех преимуществах, которые дает использование в его конструкции новой системы газовихревой стабилизации. Еще более эффективным (фактически в два раза по сравнению с ПМВР-2М и Kjellberg S-45) показал себя и новый плазмотрон ПМВР-5.3 [15], работающий по технологии узкоструйной плазмы с двухпоточной схемой газовой стабилизации. Особенно велики его преимущества по производительности, энергоэффективности, качеству реза и безопасности. Следует заметить, что показатели качества сварных швов, полученных после плазменной резки, оказались сопоставимыми для разных плазмотронов, что, очевидно, связано с меньшей зависимостью параметров сварного соединения от качества подготовленных под сварку разделочных швов, полученных резкой современными плазмотронами.

Подводя итог представленным в работе результатам и их обсуждению, следует сказать, что величина L позволяет получить объективную комплексную оценку относительной эффективности плазмотрона по отношению к другим устройствам подобного типа. Разумеется, имеется определенная субъективность при выборе весовых коэффициентов и определении перечня учитываемых параметров, которая, на наш взгляд, нивелируется при условии высокого профессионализма проводящего анализ специалиста. Отметим также, что в случае выбора потребителем, а не проектировщиком конкретной конструкции во внимание обычно принимается не сам показатель эффективности (качества), а соотношение цена/качество. Во всяком случае применение квалиметрического метода оценки эффективности работы плазмотронов для резки позволяет объективно оценить их потребительские свойства и по этому критерию.

Список литературы

1. Жуков М.Ф., Аньшаков А.С. Основы расчета плазмотронов линейной схемы. – Новосибирск: Ин-т теплофизики СО АН СССР, 1979. – 146 с.
2. Электродуговые плазмотроны: рекламный проспект / А.С. Аньшаков, Г.-Н.Б. Дандаров, В.П. Ефремов [и др.]; под ред. М.Ф. Жукова; Ин-т теплофизики. – Новосибирск, 1980. – 84 с.
3. Клименко А.А., Ляпин Г.К. Конструкции электродуговых плазмотронов. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2010. – 56 с.
4. Плазменные электротехнологические установки / В.С. Чередниченко, А.С. Аньшаков, М.Г. Кузьмин. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – 602 с.
5. Анахов С.В. Принципы и методы проектирования в электроплазменных и сварочных технологиях: учеб. пособие. – Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2014. – 144 с.
6. Анахов С.В., Пыкин Ю.А. Плазмотроны: проблема акустической безопасности. Теплофизические и газодинамические принципы проектирования малошумных плазмотронов. – Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2012. – 224 с.
7. Азгальдов Г.Г., Нагинская В.С. Оценка вариантов проекта на основе упрощенной разнородности метода квалиметрии / Моск. инженерно-строит. ин-т. – М., 1982. – 69 с.
8. Плазмотрон: пат. Рос. Федерация / Пыкин Ю.А., Анахов С.В., Матушкин А.В. – № 2584367 от 11.03.2015 // Изобретения, полезные модели. – 2016. – № 14.
9. Анахов С.В., Матушкин А.В., Пыкин Ю.А. Новый плазмотрон для резки металла под сварку: сравнительный анализ / Вестник ЮУрГУ. Металлургия. – 2015. – Т. 15, № 1. – С. 65–69.
10. Исследование качества резки стали с применением узкоструйной плазменной технологии / С.В. Анахов, Н.Б. Пугачева, Ю.А. Пыкин, А.В. Матушкин, Т.М. Быкова // Физика и химия обработки материалов. – 2016. – № 4. – С. 31–37.
11. Анализ прочности и пластичности сварных соединений, полученных с применением металлорежущих плазменных технологий / С.В. Анахов, Ю.А. Пыкин, Д.А. Голотвин, А.В. Матушкин // Сварка и диагностика. – 2016. – № 1. – С. 56–60.
12. Механические и технологические свойства сварных соединений, полученных с применением плазменной резки / С.В. Анахов, С.В. Гладковский, Ю.А. Пыкин, А.В. Матушкин, С.В. Лепихин, Д.А. Двойников // Сварочное производство. – 2016. – № 6. – С. 8–13.
13. Микроструктурный анализ сварных соединений, полученных с применением плазменных технологий резки / С.В. Анахов, Н.Б. Пугачева, Ю.А. Пыкин, А.В. Матушкин, Т.М. Быкова // Физика и химия обработки материалов. – 2016. – № 2. – С. 17–22.
14. Анахов С.В., Пыкин Ю.А., Матушкин А.В. Анализ акустической безопасности узкоструйных металлорежущих плазмотронов // Сварочное производство. – 2016. – № 1. – С. 5–9.
15. 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 Science Forum). – 2016. – Vol. 870. – P. 523–527.

References

1. Zhukov M.F., An'shakov A.S. Osnovy rascheta plazmotronov lineinoi skhemy [Bases of calculation of plasmotrons of the linear scheme]. Novosibirsk: Institut teplofiziki Sibirskoe otdelenie Rossiiskoi Akademii nauk, 1979, 146 p.
2. An'shakov A.S., Dandarov G.-N.B., Efremov V.P. et al. Elektrodugovye plazmotrony: reklamnyi prospekt [Arc plasmotrons: brochure]. Ed. M.F. Zhukova. Institut teplofiziki. Novosibirsk, 1980, 84 p.
3. Klimenko A.A., Liapin G.K. Konstruktsii elektrodugovykh plazmotronov [Designs of arc plasmotrons]. Moscow: Izdatel'stvo Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni Baumana, 2010, 56 p.
4. Cherednichenko V.S., An'shakov A.S., Kuz'min M.G. Plazmennye elektrotekhnologicheskie ustanovki [Plasma electrotechnological installations]. Novosibirsk: Izdatel'stvo Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2011, 602 p.
5. Anakhov S.V. Printsipy i metody proektirovaniia v elektroplazmennyykh i svarochnykh tekhnologiiakh: uchebnoe posobie [The principles and methods of design in electroplasma and welding technologies]. Ekaterinburg: Izdatel'stvo Rossiiskogo gosudarstvennogo professional'no-pedagogicheskogo universiteta, 2014, 144 p.
6. Anakhov S.V., Pykin Iu.A. Plazmotrony: problema akusticheskoi bezopasnosti. Teplofizicheskie i gazodinamicheskie printsipy proektirovaniia maloshumnykh plazmotronov [Plasmotrons: problem of acoustic safety. Heatphysical and gasdynamic principles of design of quiet plasmotrons]. Ekaterinburg: Izdatel'stvo Ural'skogo Otdeleniia Rossiiskoi Akademii nauk, 2012, 224 p.
7. Azgal'dov G.G., Naginskaia V.S. Otsenka variantov proekta na osnove uproschennoi raznovidnosti metoda kvalimetrii [Assessment of versions of the project on the basis of the simplified kind of a method of a kvalimetriya]. Moskovskii inzhenerno-stroitel'nyi institut, 1982, 69 p.
8. Pykin Iu.A., Anakhov S.V., Matushkin A.V. Plazmotron [Plasmatron]. Patent. Rossiiskaia Federatsiia no. 2584367 (2016).
9. Anakhov S.V., Matushkin A.V., Pykin Iu.A. Novyi plazmotron dlia rezki metalla pod svarku: sravnitel'nyi analiz [New plasmatron for cutting of metal under welding: comparative analysis]. *Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Metallurgiya*, 2015, vol. 15, no. 1, 65–69 pp.
10. Anakhov S.V., Pugacheva N.B., Pykin Iu.A., Matushkin A.V., Bykova T.M. Issledovanie kachestva rezki stali s primeneniem uzkostruinoi plazmennoi tekhnologii [Research of quality of cutting became with use of uzkostruiny plasma technology]. *Fizika i khimiia obrabotki ma-terialov*, 2016, no. 4, 31–37 pp.
11. Anakhov S.V., Pykin Iu.A., Golotvin D.A., Matushkin A.V. Analiz prochnosti i plastichnosti svarykh soedinenii, po-luchennykh s primeneniem metallorezhushchikh plazmennyykh tekhnologii [The analysis of durability and plasticity of the welded connections received with use of metal-cutting plasma technologies]. *Svarka i diagnostika*, 2016, no. 1, 56–60 pp.
12. Anakhov S.V., Gladkovskii S.V., Pykin Iu.A., Matushkin A.V., Lepikhin S.V., Dvoynikov D.A. Mekhanicheskie i tekhnologicheskie svoystva svarykh soedinenii, poluchennykh s primeneniem plazmennoi rezki [Mechanical and technological properties of the

welded connections received with application of plasma cutting]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2016, no. 6, 8–13 pp.

13. Anakhov S.V., Pugacheva N.B., Pykin Iu.A., Matushkin A.V., Bykova T.M. Mikrostrukturnyi analiz svarynykh soedinenii, poluchennykh s primeneniem plazmennykh tekhnologii rezki [The microstructural analysis of the welded connections received with use of plasma technologies of cutting]. *Fizika i khimiia obrabotki materialov*, 2016, no. 2, 17–22 pp.

14. Anakhov S.V., Pykin Iu.A., Matushkin A.V. Analiz akusticheskoi bezopasnosti uzkostruinykh metallovezhushchikh plazmotronov [Analysis of acoustic safety uzkostruinykh of metal-cutting plasmatrons]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2016, no. 1, 5–9 pp.

15. 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 Science Forum)*, 2016, vol. 870, 523–527 pp.

Получено 10.05.2017

Об авторах

Анахов Сергей Вадимович (Екатеринбург, Россия) – кандидат физико-математических наук, заведующий кафедрой физико-математических дисциплин Российского государственного профессионально-педагогического университета; e-mail: sergej.anahov@rsvpu.ru.

Пыкин Юрий Анатольевич (Екатеринбург, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры физико-химических технологий защиты биосферы Уральского государственного лесотехнического университета; e-mail: yapoligon@mail.ru.

Матушкин Анатолий Владимирович (Екатеринбург, Россия) – старший преподаватель кафедры технологии сварочного производства Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина; e-mail: 227433@rambler.ru.

About the authors

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

Yurij A. Pykin (Ekaterinburg, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Physico-Chemical Technologies of Biosphere Protection, Ural State Forest Engineering University; e-mail: yapoligon@mail.ru.

Anatolij V. Matushkin (Ekaterinburg, Russian Federation) – Senior Lecturer, Department of Technology of Welding Production, Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin; e-mail: 227433@rambler.ru.