

Стойкостные испытания расходных элементов плазмотрона при тонкоструйной плазменной резке

Х.М. Рахимьянов^a, Н.П. Гаар^b, А.А. Локтионов^c

Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса 20, Новосибирск, Россия

^akharis51@mail.ru, ^blianelas@mail.ru, ^cpushkin-lok@mail.ru

Статья поступила 16.12.2015, принята 9.01.2016

Представлены результаты исследований по оценке стойкости расходных элементов аппаратной части тонкоструйной плазменной резки. Отмечены причины, вызывающие износ основных расходных элементов плазмотрона — катода, сопла и колпачка сопла. Установлено, что износ катода определяется интенсивностью эмиссионных процессов при зажигании дуги, износ сопла — тепловыми и механическими воздействиями, износ колпачка сопла — воздействием двойного дугообразования. Вопрос замены расходных элементов становится особо важным при обработке изделий в полуавтоматическом цикле, когда время обработки соизмеримо или превышает период стойкости расходных элементов. Проведенный сравнительный анализ наборов с различными катодами показал, что использование катодов с повышенным ресурсом по сравнению с обычным позволило увеличить как общее число пробивок с 620 до 803, так и длину пути реза — с 66 до 88 м. Полученные данные соответствуют работе в рекомендованных производителем режимах раскроя. Дальнейшее повышение ресурса оказалось возможным при снижении скорости реза до 30 %. При этом количество пробивок для наборов с обычным катодом увеличилось до 860, а путь реза — до 102 м. Использование в наборах расходных элементов катода с повышенным ресурсом на пониженных скоростях позволило дополнительно увеличить ресурс его работы. Так, количество пробивок выросло до 1 024, а путь — до 116 м. Снижение скорости реза при повышении ресурса работы не привело к снижению качества обработки. Результатом проведенных исследований является рекомендация по использованию катодов с повышенным ресурсом работы и снижению скорости реза при длительных циклах обработки.

Ключевые слова: тонкоструйная плазменная резка; катод; сопло; плазменная дуга; износ; стойкость расходных элементов.

Wear resistant test for consumable items of a plasma cutter under high-precision plasma cutting

Kh.M. Rakhimyanov^a, N.P. Gaar^b, A.A. Loktionov^c

Novosibirsk State Technical University; 20, K. Marks ave., Novosibirsk, Russia

^akharis51@mail.ru, ^blianelas@mail.ru, ^cpushkin-lok@mail.ru

Received 16.12.2015, accepted 9.01.2016

The article presents the results of wear resistant tests for consumable items of a plasma cutter's hardware under high-precision plasma cutting. The causes of deterioration of the basic elements of the plasma cutter's consumables such as cathode, nozzle cap and nozzle are shown. It was found that the wear of the cathode is determined by the intensity of the emission processes in the arc ignition, the wear of nozzle is determined by thermal and mechanical stress and the wear of nozzle cap is determined by the influence of the double arcing. It is shown that the issue of replacing consumable items becomes especially important in the processing in semi-automatic cycle, when the processing time is comparable to or greater than durability of consumable items. Comparative analysis of sets with different cathodes showed that the use of cathodes with increased service life as opposed to normal allowed increasing the total number of punched holes 620 to 803, and the path length of cut from 66 m to 88 m. These values correspond to operation at the manufacturer's recommended conditions of cutting. A further increase of resource can be possible at lower cutting speed up to 30%. The number of punched holes for sets is increased to 860, and the way of cutting is up to 102 m. Using sets of consumables to the cathode elements with increased service life at reduced speeds made it possible to increase its service life over. Thus, the number of punched holes grew to 1,024, and the length of cut to 116 m. Reducing the cutting speed with increasing service life has not led to a decrease in the quality of cutting. The result of the research is recommendation to use cathodes with an increased service life and reduced cutting speed at longer processing time.

Key words: high-precision plasma cutting; cathode; nozzle; plasma arc; wear; service life of consumable items.

Введение

В технологии изготовления машиностроительной продукции основное место традиционно занимают процессы механической обработки (лезвийной и абразивной). В последние десятилетия значительное вни-

мание уделялось исследованию и развитию различного рода электрофизических технологий, основанных на иных механизмах формообразования обрабатываемых поверхностей. К таким технологиям следует отнести термические методы раскроя металлических материалов — лазерную и тонкоструйную плазменную резку.

Перспективность использования плазменного раскроя, его технологические возможности отражены в работах [1–4]. Некоторые исследователи рассматривают тонкоструйную плазменную резку как достойную альтернативу лазерной технологии [5]. Актуальность исследований в области развития современной модификации плазменного раскроя металлических материалов подтверждается в работах [6; 7], посвященных оптимизации процесса по параметрам удельного выноса обрабатываемого материала и формированию шероховатости поверхности реза. Работы авторов [8–10] посвящены выявлению степени влияния технологических параметров обработки на формирование кромок реза и подтверждают перспективность данной технологии в достижении высоких показателей качества реза при обработке различных классов металлических материалов. С этим связан интерес к теоретическим исследованиям высокоэнергетического плазменного нагрева, направленным на моделирование процессов в зоне обработки [11–15]. Теоретические исследования возникновения погрешностей формообразования при тонкоструйной плазменной резке [16] ориентированы на развитие технологических аспектов данного метода обработки. Экспериментальные исследования, посвященные изучению точности и качества реза при тонкоструйной плазменной резке, подтвердили ее эффективность как современной технологии заготовительного производства [17–19].

Специфика электрофизических технологий заключается в том, что инструментами при обработке могут быть лазерный луч, плазменная дуга или электрическое поле, не подверженные традиционному для механической обработки износу или выходу из строя вследствие поломки. Тем не менее, в аппаратной части, реализующей эти технологии, присутствуют детали, которые имеют ограниченный ресурс работы, и их следует рассматривать как расходные элементы. Для тонкоструйной плазменной резки к таким элементам в первую очередь относятся катод, сопло и колпачок сопла. Ограниченный ресурс работы объясняется тем, что в процессе работы на них оказывают влияние такие воздействия, как температурное — от столба плазменной дуги, механическое, вызванное движением газовых потоков, а также эмиссионные процессы на катоде. Это вызывает увеличение диаметра отверстия сопла с потерей его геометрии и выгорание тугоплавкой вставки катода, что ухудшает энергоэффективность плазменной дуги. Как следствие, снижается качество реза и возникает брак. Помимо размерного износа сопла и катода при тонкоструйной плазменной резке возможно возникновение такого негативного явления, как двойное дугообразование. Это связано с тем, что помимо режущей дуги между катодом, элементами обрабатываемого материала на срезе сопла или колпачка и обрабатываемым материалом возникают дополнительные дуги, вызывающие катастрофический износ расходных элементов и выход их из строя. Причины и условия возникновения двойного дугообразования рассмотрены в работе [20].

Возможные виды износа расходных элементов плазматрона представлены в работе [21], а влиянию их износа на точность формообразования посвящены исследования [22–24]. Пути повышения стойкости рас-

ходных элементов плазматрона отражены в работах [25; 26].

Помимо традиционных технологических параметров плазменного раскроя (ток дуги, напряжение, давление и расход режущего и завихряющего газов, их состав и т. д.), определяющих процесс термической резки, исследователями доказано, что звуковая характеристика (шум-фактор) истечения плазменной струи может служить информационным сигналом о течении процесса обработки и состоянии расходных элементов [27–31].

Тонкоструйная плазменная резка, предназначенная для получения сложнопрофильных деталей, являясь технологией заготовительного производства, выполняется на технологических комплексах, оснащенных системой ЧПУ. Зачастую время обработки одной детали превышает период стойкости расходных элементов плазматрона. Необходимость их замены по ходу обработки не позволяет реализовать ее в режиме полуавтоматического цикла.

В связи с этим целью исследования стал поиск путей повышения ресурса работы расходных элементов плазматрона в условиях полуавтоматического цикла.

Подробности экспериментов. Технология тонкоструйной плазменной резки предназначена для контурного раскроя конструкционных, нержавеющей сталей, а также сплавов на основе меди и алюминия. С точки зрения сочетания теплофизических свойств и вязкости материала, а также его распространенности как конструкционного, большой интерес представляют нержавеющие стали, поэтому в качестве исследуемого материала была выбрана нержавеющая сталь 12Х18Н9Т.

Стойкостные испытания проводились при использовании новых расходных элементов плазматрона при осуществлении раскроя нержавеющей стали толщиной 6 мм. Исследования проводились на машине термической резки «Термит ППл». В состав данной установки входят система ЧПУ Burny Phantom ST (1), координатный стол портального исполнения (2), источник тонкоструйной плазменной резки HiFocus 130 с газовой консолью (3), плазматрон (4) и газобаллонное оборудование (5) (рис. 1).

Оценка стойкости расходных элементов осуществлялась при резке детали типа «сито грохота» (рис. 2). Отличительной особенностью данной детали являлось наличие большого количества (1 752 шт.) отверстий одинакового размера.

В исследованиях замена расходных элементов (сопла и катода) осуществлялась одновременно.

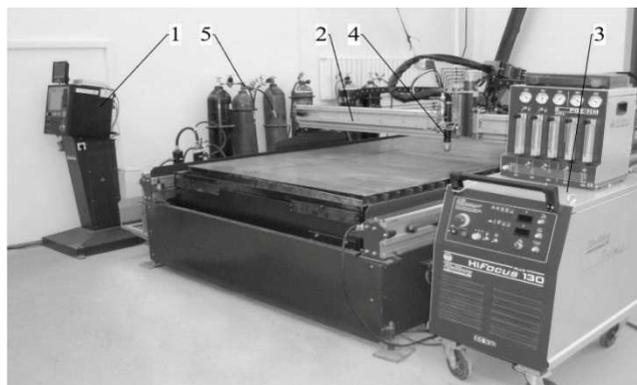


Рис. 1. Машина термической резки «Термит ППл»

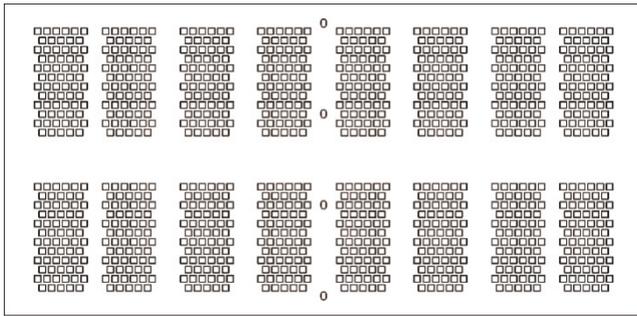


Рис. 2. Сито грохота

Экспериментально установлено, что существует предельная величина износа расходных элементов. Так для катода предельной величиной износа является появление лунки глубиной 1,8 мм (рис. 3).

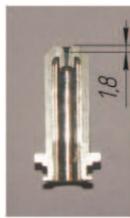


Рис. 3. Выработка лунки на катоде

Дальнейшее увеличение выработки приводит к нестабильности поджига пилотной дуги и, следовательно, к прерыванию обработки в целом. Как отмечалось выше, износ данного элемента плазматрона связан с эмиссионными процессами на катодной вставке. Предвестником наступления предельного износа катода является появление специфического свиста (увеличение шум-фактора работы комплекса).

Износ сопла характеризуется постепенным увеличением его выходного канала и изменением геометрии поперечного сечения. При соблюдении технологических режимов и рекомендаций, исключающих двойное дугообразование, износ сопла должен выражаться в постепенном увеличении диаметра выходного канала, однако в реальных условиях обработки, особенно при преобладании одного из направлений в перемещении плазматрона, наблюдается неравномерный износ канала сопла, что характеризуется появлением эллипсности в его поперечном сечении (рис. 4).

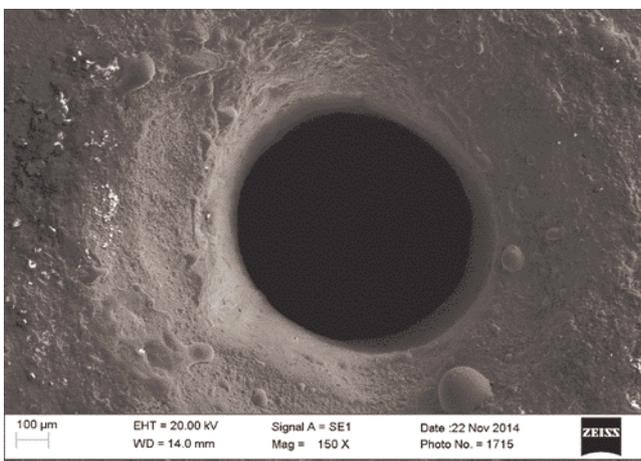


Рис. 4. Эллиптическая форма канала сопла

В итоге превышение допустимого износа сопла приводит к появлению недорезов при обработке отверстий в зоне захода – выхода плазменной дуги.

В исследованиях были использованы два типа катодов — обычный (S002x) и с повышенным ресурсом работы (S002y). При этом использовалось сопло одного типоразмера (S2008x). В табл. 1 представлены рекомендованные производителем режимы плазменного раскроя, в табл. 2 — составы, давление и расход используемых в обработке газов.

Таблица 1

Режимы обработки

Толщина реза, мм	6
Ток, А	50
Скорость обработки, м/мин	1,5
Время пробивки, сек	0,3
Высота пробивки, мм	3
Высота реза, мм	2
Напряжение, В	125

Таблица 2

Рекомендуемые газы

Технология резки	HiFocus ^{plus}
Толщина реза, мм	6
Зажигающий газ — воздух (давление/ расход)	5 бар/20 дел. шкалы
Режущий газ — кислород (давление/ расход)	10 бар/20 дел. шкалы
Завихряющий газ 1 — кислород (давление/ расход)	—
Завихряющий газ 2 — азот (давление/ расход)	5 бар/40 дел. шкалы

Кроме рекомендованных значений режимов обработки, для повышения стойкости расходных элементов проводились исследования на сниженных (на 30 %) скоростях реза.

Результаты и обсуждение. Результаты стойкостных исследований наборов расходных элементов представлены на рис. 5. Для каждого из исследуемых наборов приведено усредненное по пяти значениям количество пробивок и длины реза.

При использовании в наборе расходных элементов плазматрона катода S002x количество пробивок изменялось от 528 до 730, при этом длина реза соответственно варьировалась от 56 до 77 м. Таким образом, среднее значение количества пробивок для наборов с катодом S002x при скорости резки 1,5 м/мин составляло 620, а среднее значение длины реза — 66 м.

Очевидно, что снижение скорости резки на 30 % позволило увеличить длину реза и повысить число пробивок (рис. 5). Усредненное значение количества пробивок равнялось 860, при этом средняя длина реза составила 102 м. Таким образом, снижение скорости позволило повысить количество пробивок на 240 и увеличить длину реза на 36 м.

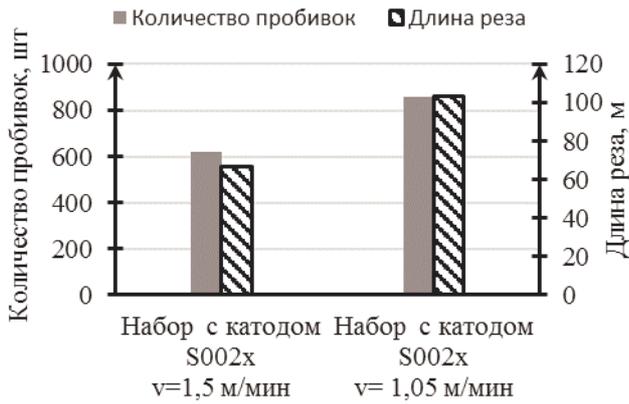


Рис. 5. Стойкость наборов с катодом S002x при разных скоростях обработки

На рис. 6 представлены стойкостные исследования при использовании в наборе расходных элементов катода S002y с повышенным ресурсом работы. Как и в случае использования наборов расходных элементов с катодом S002x, для наборов с катодом S002y раскрой материала осуществлялся на рекомендованных производителем режимах обработки и при пониженной скорости резки.

Использование катодов с повышенным ресурсом работы позволило повысить количество пробивок. Усредненное значение количества пробивок для наборов с катодом S002y при скорости резки 1,5 м/мин составило 803, а среднее значение длины реза — 88 м. Снижение скорости раскроя на 30 % позволило увеличить количество пробивок до 1 024 и длину реза — до 116 м. Таким образом, снижение скорости позволило повысить количество пробивок на 221 и увеличить длину реза на 28 м.

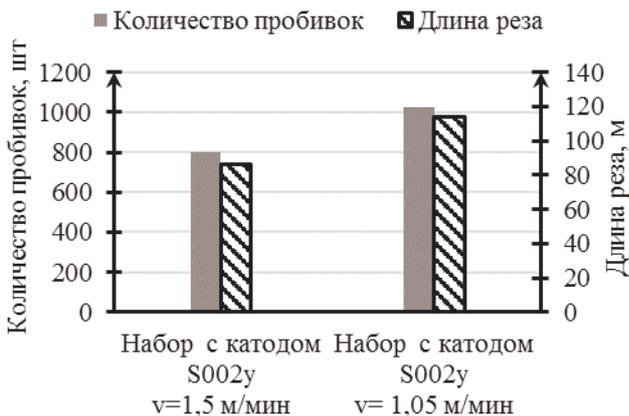


Рис. 6. Стойкость наборов с катодом S002y при разных скоростях обработки

Сравнивая наборы расходных элементов с обычным катодом и катодом с повышенным ресурсом, следует отметить, что использование последнего в наборе привело к увеличению как числа пробивок (на 183), так и длины реза (на 22 м) при рекомендуемом значении скорости резки. Использование в наборе катодов с повышенным ресурсом при снижении скорости резки

обеспечивает увеличение длины реза и количества пробивок.

Увеличение рабочего ресурса набора расходных элементов плазматрона, связанное со снижением скорости раскроя для обеих комплектаций, можно объяснить с позиции теплопередачи в канале реза. Как отмечено в работе [32], при снижении скорости раскроя время действия теплового источника для нагрева обрабатываемого материала вплоть до его расплавления оказывается достаточным, чтобы фронт расплава по каналу реза оказался на максимально возможном расстоянии от оси теплового источника. Последнее определяет наличие оболочки изолирующего газа вокруг столба плазменной дуги, которая в свою очередь способствует заглублению анодного пятна. От его положения зависит характер теплопередачи в канале реза, а, следовательно, удаление продуктов расплава из зоны обработки. Кроме этого, на разделение материала в зоне захода – выхода и возникновение недорезов в отмеченной области оказывает влияние траектория истечения жидкой фазы из канала реза. Согласно данным работы [33], оптимизация траектории истечения (мгновенное положение фронтальной поверхности реза) продуктов жидкой фазы материала из канала реза возможна за счет изменения скорости раскроя.

Выводы

Установлено, что в наборах расходных элементов как с обычными катодами, так и с катодами, обладающими повышенным ресурсом, снижение скорости резки обеспечивает повышение стойкости расходных элементов (увеличение количества пробивок, длины реза), что является благоприятным фактором при раскрое материалов с длительным циклом обработки.

Литература

1. Molchanova Y.S., Bychkov N.A., Chernyayev S.I. Producing orifices in structural materials by plasma, waterjet and laser cutting and piercing // *Welding International*. 2015. Vol. 29, № 2. P. 161-164.
2. Vasil'ev K.V. Plasma-arc cutting – a promising method of thermal cutting // *Welding International*. 2003. Vol. 17, № 2. P. 147-151.
3. Nishiguchi K. Matsuyama. The introduction of low current plasma cutting machines — a review // *Welding International*. 1987. Vol. 1, № 8. P. 780-789.
4. Vasil'ev K.V., Chernyak R.V. Examination of plasma-forming additions in oxygen-plasma cutting // *Welding International*. 1994. Vol. 8, № 11. P. 904-908.
5. Ian Kirkpatrick. High definition plasma - an alternative to laser technology // *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*. 1998. Vol. 70, № 3. P. 215-217.
6. Kumar M. D. Optimization of Process Parameters in Plasma arc Cutting of EN 31 Steel Based on MRR and Multiple Roughness Characteristics Using Grey Relational Analysis // *Procedia Materials Science*. 2014. Vol. 5. P. 1550-1559.
7. Özek C. A Fuzzy Model for Predicting Surface Roughness in Plasma Arc Cutting of AISI 4140 Steel // *Materials and Manufacturing Processes*. 2012. Vol. 27, № 1. P. 95-102.
8. Çelik Y.H. Investigating the Effects of Cutting Parameters on Materials Cut in CNC Plasma // *Materials and Manufacturing Processes*. 2013. Vol. 28, № 10. P. 1053-1060.

9. Salonitis K., Vatousianos S. Experimental Investigation of the Plasma Arc Cutting Process // *Procedia CIRP*. 2012. Vol. 3. P. 287–292.
10. Zajac A., Pfeifer T. Restricting the heat-affected zone during the plasma cutting of high-alloy steels // *Welding International*. 2006. Vol. 20. № 1. P. 5–9.
11. Narimanyan A. Unilateral conditions modelling the cut front during plasma cutting: FEM solution // *Applied mathematical modelling*. 2009. Vol. 33, № 1. P. 176–197.
12. Dashkovskiy S., Narimanyan A. Thermal plasma cutting. Part I: Modified mathematical model // *Mathematical Modelling and Analysis*. 2007. Vol. 12, № 4. P. 441–458.
13. Wang J., Kusumoto K., Nezu K. Modelling and prediction of cut shape for plasma arc cutting based on artificial neural network // *Science and Technology of Welding and Joining*. 1999. Vol. 4, № 4. P. 195–200.
14. Рахимьянов Х.М., Рахимьянов А.Х., Лунин С.В. Моделирование тепловых процессов тонкоструйной плазменной резки // *Инновации в машиностроении: сб. тр. междунар. научно-практ. конф. Кемерово, 2011. С. 161–165.*
15. Рахимьянов Х.М., Журавлев А.И., Локтионов А.А., Рахимьянов А.Х. Моделирование процесса тонкоструйной плазменной резки для обеспечения точности формообразования криволинейных контуров // *Научн. вестн. НГТУ*. 2009. № 4. С. 123–134.
16. Локтионов А.А., Рахимьянов Х.М. Анализ погрешностей формообразования при тонкоструйной плазменной резке металлических материалов // *Современные проблемы в технологии машиностроения: сб. тр. всерос. научно-практ. конф. Новосибирск, 2009. С. 151–153.*
17. Рахимьянов Х.М., Локтионов А.А., Никитин Ю.В. Оценка геометрической точности реза листовых материалов при различных технологиях тонкоструйной плазменной резки // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2013. № 3 (60). С. 25–30.
18. Локтионов А.А. Оценка качества реза листовых материалов при тонкоструйной плазменной резке // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2013. № 4 (61). С. 86–91.
19. Рахимьянов Х.М., Локтионов А.А. Влияние технологий тонкоструйной плазменной резки на формирование шероховатости поверхности реза // *Материалы 7 Международной научно-технической конференции «Современные проблемы машиностроения»: сб. тр. Томск, 2013. С. 349–353.*
20. Yamaguchi Y., Katada Y., Ito T., Uesugi Y., Tanaka Y., Ishijima T. Experimental study of magnetic arc blow for plasma arc cutting // *Welding International*. 2015. Vol. 29, № 10. P. 745–753. DOI: 10.1080/09507116.2014.921075.
21. Локтионов А.А., Рахимьянов Х.М., Журавлев А.И. Износ расходных элементов плазматрона при термической резке листового материала // *Материалы докладов II Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации)*. Иркутск, 2012. С. 61–65.
22. Рахимьянов Х.М., Локтионов А.А. Точность формообразования при тонкоструйной плазменной резке металлических материалов и пути ее повышения // *Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты*. 2009. № 4. С. 31–32.
23. Рахимьянов Х.М., Локтионов А.А. Влияние износа расходных элементов на точность формообразования при тонкоструйной плазменной резке // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2011. № 4. С. 14–18.
24. Рахимьянов Х.М., Локтионов А.А. Разновидности катодов, применяемых для плазменной резки, и влияние степени износа их на точность формообразования // *Материалы 10-ой Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе»*. Новосибирск, 2012. С. 68–71.
25. Janardhana G.R., Kumar M.S., Dhanasekar B. Experimental Analysis of Different Coolants Used in Plasma Cutting Operation for the Improved Electrode Life // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 719-720. P. 46–49.
26. Kumar M.S., Dhanasekar B. Numerical simulation and experimental verification of electrode life for different coolants and its flow in plasma cutting torch // *International Journal of Intelligent Information Processing*. 2012. Vol. 3, № 2. P. 77–85.
27. Pykin Y.A., Steklov O.I. Noise factor in the plasma cutting of metal // *Welding International*. 2003. Vol. 17, № 2. P. 162–164.
28. Xue W., Kusumoto K., Nezu K. Measurement and Analysis of Plasma Arc Cutting Acoustic Signal // *Materials Science Forum*. 2004. Vol. 449-452. P. 313–316. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.449-452.313.
29. Kusumoto R., Chen Q.G., Xue W. Monitoring of plasma arc cutting process by cutting sound // *Science and Technology of Welding and Joining*. 2006. Vol. 11, № 6. P. 701–706.
30. Xue W., Kusumoto K., Nezu K. Relationship between plasma arc cutting acoustic and cut quality // *Science and Technology of Welding and Joining*. 2005. Vol. 10. № 1. P. 44–49.
31. Xue W., Kusumoto K., Nezu K. Analysis of acoustic characteristics for plasma arc cutting // *Science and Technology of Welding and Joining*. 2003. Vol. 8. № 6. P. 443–449.
32. Рахимьянов Х.М., Гаар Н.П., Журавлев А.И., Локтионов А.А., Рахимьянов А.Х. Влияние скорости обработки на положение анодного пятна и перпендикулярность кромок при тонкоструйном плазменном раскрое // *Механика XXI века*. 2015. № 14. С. 119–122.
33. Loktionov A.A., Gaar N.P. Influence of Technological Parameters of High-Precision Plasma Cutting on the Position of the Anode Spot on the Cut Edge // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 788. P. 46–51.

References

1. Molchanova Y.S., Bychkov N.A., Chernyayev S.I. Producing orifices in structural materials by plasma, waterjet and laser cutting and piercing // *Welding International*. 2015. Vol. 29, № 2. P. 161-164.
2. Vasil'ev K.V. Plasma-arc cutting – a promising method of thermal cutting // *Welding International*. 2003. Vol. 17, № 2. P. 147-151.
3. Nishiguchi K. Matsuyama. The introduction of low current plasma cutting machines - a review // *Welding International*. 1987. Vol. 1, № 8. P. 780-789.
4. Vasil'ev K.V., Chernyak R.V. Examination of plasma-forming additions in oxygen-plasma cutting // *Welding International*. 1994. Vol. 8, № 11. P. 904-908.
5. Ian Kirkpatrick. High definition plasma - an alternative to laser technology // *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*. 1998. Vol. 70, № 3. P. 215-217.
6. Kumar M. D. Optimization of Process Parameters in Plasma arc Cutting of EN 31 Steel Based on MRR and Multiple Roughness Characteristics Using Grey Relational Analysis // *Procedia Materials Science*. 2014. Vol. 5. P. 155-1559.
7. Özek S. A Fuzzy Model for Predicting Surface Roughness in Plasma Arc Cutting of AISI 4140 Steel // *Materials and Manufacturing Processes*. 2012. Vol. 27, № 1. P. 95-102.
8. Çelik Y.H. Investigating the Effects of Cutting Parameters on Materials Cut in CNC Plasma // *Materials and Manufacturing Processes*. 2013. Vol. 28, № 10. P. 1053-1060.
9. Salonitis K., Vatousianos S. Experimental Investigation of the Plasma Arc Cutting Process // *Procedia CIRP*. 2012. Vol. 3. P. 287-292.
10. Zajac A., Pfeifer T. Restricting the heat-affected zone during the plasma cutting of high-alloy steels // *Welding International*. 2006. Vol. 20. № 1. P. 5-9.

11. Narimanyan A. Unilateral conditions modelling the cut front during plasma cutting: FEM solution // *Applied mathematical modeling*. 2009. Vol. 33, № 1. P. 176-197.
12. Dashkovskiy S., Narimanyan A. Thermal plasma cutting. Part I: Modified mathematical model // *Mathematical Modelling and Analysis*. 2007. Vol. 12, № 4. P. 441-458.
13. Wang J., Kusumoto K., Nezu K. Modeling and prediction of cut shape for plasma arc cutting based on artificial neural network // *Science and Technology of Welding and Joining*. 1999. Vol. 4, № 4. P. 195-200.
14. Rakhimyanov Kh.M., Rakhimyanov A.Kh., Lunin S.V. Mathematical modeling of high-precision plasma arc cutting is represented // *Innovatsii v mashinostroenii: sb. tr. mezhdunar. nauchno-prakt. konf. Kemerovo*, 2011. P. 161-165.
15. Rakhimyanov Kh.M., Zhuravlev A.I., Loktionov A.A., Rakhimyanov A.Kh. High-precision plasma arc cutting modeling for shaping accuracy of cam contours assurance // *Scientific Bulletin of NSTU*. 2009. № 4. P. 123-134.
16. Loktionov A.A., Rakhimyanov Kh.M. Analysis of errors in forming trickle plasma cutting metal materials // *Sovremennye problemy v tekhnologii mashinostroeniya: sb. tr. vseros. nauchno-prakt. konf. Novosibirsk*, 2009. P. 151-153.
17. Rakhimyanov Kh.M., Loktionov A.A., Nikitin Yu.V. Evaluation of geometric precision cut of sheet materials with different high-precision plasma cutting technologies // *Obrabotka Metallov*. 2013. № 3 (60). P. 25-30.
18. Loktionov A.A. Assessment a cut of quality of sheet materials in the conditions of high-precision plasma cutting // *Obrabotka Metallov*. 2013. № 4 (61). P. 86-91.
19. Rakhimyanov Kh.M., Loktionov A.A. Impact of technology trickle plasma cutting on the formation of the surface roughness of the cut Vliyaniye tekhnologii tonkostruinoi plazmennoi rezki na formirovaniye sherokhovatosti poverkhnosti rez // *Materialy 7 Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Sovremennye problemy mashinostroeniya»: sb. tr. Tomsk*, 2013. P. 349-353.
20. Yamaguchi Y., Katada Y., Itou T., Uesugi Y., Tanaka Y., Ishijima T. Experimental study of magnetic arc blow for plasma arc cutting // *Welding International*. 2015. Vol. 29, № 10. P. 745-753. DOI: 10.1080/09507116.2014.921075.
21. Loktionov A.A., Rakhimyanov Kh.M., Zhuravlev A.I. Depreciation cost elements in the thermal plasma torch cutting sheet material // *Materialy dokladov II Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Zhiznennyi tsil konstruksionnykh materialov (ot polucheniya do utilizatsii)». Irkutsk*, 2012. P. 61-65.
22. Rakhimyanov Kh.M., Loktionov A.A. Shaping accuracy at high-precision plasma arc cutting metal and the way of its increase // *Obrabotka Metallov*. 2009. № 4. P. 31-32.
23. Rakhimyanov Kh.M., Loktionov A.A. Deterioration of consumable elements influence on accuracy forming at high-precision plasma cutting Vliyaniye iznosa raskhodnykh elementov na tochnost' formoobrazovaniya pri tonkostruinoi plazmennoi reze // *Obrabotka Metallov*. 2011. № 4. P. 14-18.
24. Rakhimyanov Kh.M., Loktionov A.A. Varieties of the cathodes applied to a plasma cutting, and agency of their wear rate on exactitude of a morphogenesis // *Materialy 10-oi Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Problemy povysheniya effektivnosti metalloobrabotki v promyshlennosti na sovremennom etape»*. Novosibirsk, 2012. P. 68-71.
25. Janardhana G.R., Kumar M.S., Dhanasekar B. Experimental Analysis of Different Coolants Used in Plasma Cutting Operation for the Improved Electrode Life // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 719-720. P. 46-49.
26. Kumar M.S., Dhanasekar B. Numerical simulation and experimental verification of electrode life for different coolants and its flow in plasma cutting torch // *International Journal of Intelligent Information Processing*. 2012. Vol. 3, № 2. P. 77-85.
27. Pykin Y.A., Steklov O.I. Noise factor in the plasma cutting of metal // *Welding International*. 2003. Vol. 17, № 2. P. 162-164.
28. Xue W., Kusumoto K., Nezu K. Measurement and Analysis of Plasma Arc Cutting Acoustic Signal // *Materials Science Forum*. 2004. Vol. 449-452. P. 313-316. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.449-452.313.
29. Kusumoto R., Chen Q.G., Xue W. Monitoring of plasma arc cutting process by cutting sound // *Science and Technology of Welding and Joining*. 2006. Vol. 11, № 6. P. 701-706.
30. Xue W., Kusumoto K., Nezu K. Relationship between plasma arc cutting acoustic and cut quality // *Science and Technology of Welding and Joining*. 2005. Vol. 10, № 1. P. 44-49.
31. Xue W., Kusumoto K., Nezu K. Analysis of acoustic characteristics for plasma arc cutting // *Science and Technology of Welding and Joining*. 2003. Vol. 8, № 6. P. 443-449.
32. Rakhimyanov Kh.M., Gaar N.P., Zhuravlev A.I., Loktionov A.A., Rakhimyanov A.Kh. Influence of cutting speed to the position of the anode spot and perpendicular edges in the high-precision plasma cutting // *Mekhaniki XXI veku*. 2015. № 14. P. 119-122.
33. Loktionov A.A., Gaar N.P. Influence of Technological Parameters of High-Precision Plasma Cutting on the Position of the Anode Spot on the Cut Edge // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 788. P. 46-51.