

**МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ**

DOI: 10.26730/1999-4125-2018-2-70-75

УДК 621.791.947.55, 621.9.01

**ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ДЕФЕКТОВ РЕЗА ЗА СЧЕТ ОПТИМИЗАЦИИ ТРАЕКТОРИИ ПРИ ТОНКОСТРУЙНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКЕ****PREVENTION OF CUTTING DEFECTS BY OPTIMIZING THE TRAJECTORY FOR HIGH-PRECISION PLASMA CUTTING****Гаар Надежда Петровна,**

канд. техн. наук, доцент, e-mail: gaar@corp.nstu.ru

**Nadezhda P. Gaar, Ph.D. (Engineering), Associate Professor,****Рахимьянов Андрей Харисович,**

канд. техн. наук, доцент, e-mail: a.rakhimyanov@corp.nstu.ru,

**Andrei Kh. Rakhimyanov, Ph.D. (Engineering), Associate Professor,****Локтионов Александр Анатольевич,**

старший препод., e-mail: loktionov@corp.nstu.ru

**Aleksandr A. Loktionov, M.Sc. (Engineering), Lecturer,**

Новосибирский государственный технический университет 630073, Россия,

г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073,

Russian Federation

**Аннотация:** Тонкоструйная плазменная резка является одной из модификаций плазменно-дугового раскроя металлических материалов. Возможности данного вида раскроя материала таковы, что качество получаемой поверхности реза детали близко к лазерной резке, и в некоторых случаях возможно исключение последующей их механической обработки. Однако, при тонкоструйной плазменной резке возможно появление различного рода локальных дефектов. Целью данной работы является минимизация локального дефекта в виде скругления, возникающего при раскрое материала при смене направления движения. Экспериментальные исследования проводились на конструкционной стали марки Ст3 толщиной от 4 до 20 мм на машине термической резки «Термит ППл» при использовании технологии тонкоструйной плазменной резки HiFocus<sup>plus</sup>. В результате экспериментов установлено, что радиус скругления материала увеличивается с ростом толщины разрезаемого материала. Предложено использование «петель» в траектории движения плазмотрона для исключения участков разгона и торможения на контуре при резке материалов. Экспериментально установлено, что применение «петель» приводит к снижению значений радиуса скругления до 2 раз по сравнению с раскроем материала без их использования.

**Abstract:** High-precision plasma cutting is one of the modifications of plasma-arc cutting of metallic materials. The possibilities of this kind of material cutting are characterized by the fact that the quality of the obtained cut face of the part is close to laser cutting, and in some cases, it is possible to exclude subsequent machining of such parts. However, with high-precision plasma cutting, the appearance of various kinds of local defects is possible. The purpose of this paper is to minimize the local defect in the form of a rounding that occurs during material cutting when changing the direction of motion. Experimental studies were carried out on structural steel grade St3 of 4 to 20 mm thickness using the thermal cutting machine "Termite PPL" and HiFocus<sup>plus</sup> high-precision plasma cutting technology. As a result of experiments, it was established that the radius of rounding increases with the thickness of the material being cut. The use of "loops" in the motion path of the plasma torch is proposed to exclude the acceleration and deceleration zones on the contour when cutting materials. It is experimentally established that the use of "loops" leads to a reduction in the radius of the rounding up to 2 times compared with cutting of the material without using them.

**Ключевые слова:** тонкоструйная плазменная резка, радиусы скругления, дефекты при резке материалов, петля, схема резки.

**Key words:** High-precision plasma cutting, radii of rounding, defects in cutting materials, loop, scheme of cutting.

### Введение

Все большее распространение в заготовительном производстве получают термические методы листового раскроя материалов, такие как кислородная [1-3], лазерная [4-7], плазменная резки [8-18]. Совершенствование плазменных технологий в области резки металлических материалов привело к созданию новой модификации плазменного раскроя – тонкоструйной плазменной резки, что позволило рассматривать ее как альтернативу лазерной резке с позиции точности и качества раскроя металлических материалов [19, 20].

Тонкоструйная плазменная резка является одной из современных методов раскроя листового материала. Процесс разделения материала при

этом способе происходит за счет разогрева материала сжатой плазменной дугой до температуры плавления и выдува расплавленного материала из зоны обработки. Точность и качество реза при данном методе обработки будут, в первую очередь, зависеть от технологических параметров обработки [21-25]. Однако, в связи с особенностями физики процесса на поверхности деталей могут возникать дефекты, не зависящие от выбранных режимов обработки. Например, при обработке изделий типа «прямоугольник» на углах возникают точки с нулевой скоростью при смене направления движения (рис.1). Вблизи точки смены направления существуют участки торможения и разгона. Поскольку в отмеченной области время

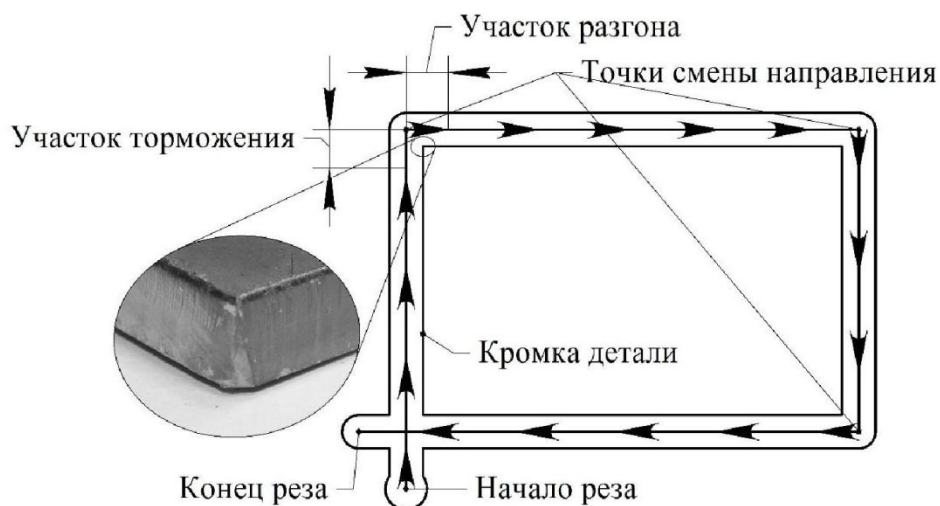


Рис. 1. Смена направления при резке

Fig. 1. Change direction in cutting

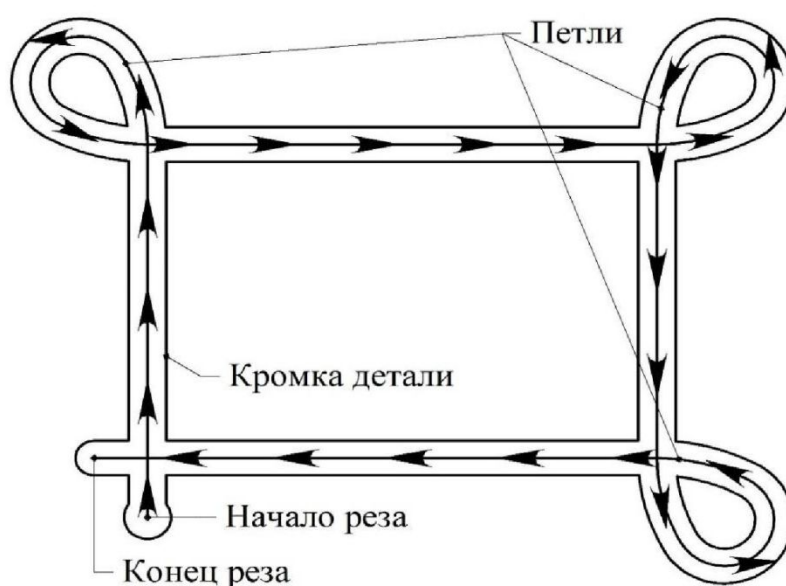


Рис. 2. Схема резки при использовании «петель»

Fig. 2. Scheme of cutting with the use of "loops"

Таблица 1

Table 1

Технология резки	Толщина, мм	Катод	Газификатор	Сопло	Колпачок сопла	Колпачок завихряющего газа	Защитный колпачок
HiFocus <sup>plus</sup>	4	S002	Z102	S2008x	S3028	Z4020	Z501
	6			S2012x		Z4022	
	10						
	16						
	20						

Таблица 2

Table 2

Технология резки	Толщина, мм	Ток, А	Скорость резки, м/мин	Время пробивки, сек	Высота пробивки, мм	Высота реза, мм	Напряжение, В
HiFocus <sup>plus</sup>	4	50	2,2	0,2	3	1,5	119
	6	50	1,5	0,3	3	2	125
	10	130	2,4	0,4	4	2	133
	16	130	1,8	0,4	5	2	140
	20	130	1	0,6	6,5	2,5	150

Таблица 3

Table 3

Технология резки	Толщина, мм	Зажигающий газ - воздух (давление/ расход)	Режущий газ – кислород (давление/ расход)	Завихряющий газ – азот (давление/ расход)
HiFocus <sup>plus</sup>	4	5 бар/15 дел. шкалы	10 бар/20 дел. шкалы	5 бар/50 дел. шкалы
	6	5 бар/20 дел. шкалы	10 бар/20 дел. шкалы	5 бар/40 дел. шкалы
	10	5 бар/25 дел. шкалы	10 бар/60 дел. шкалы	5 бар/45 дел. шкалы
	16	5 бар/25 дел. шкалы	10 бар/60 дел. шкалы	5 бар/60 дел. шкалы
	20	5 бар/25 дел. шкалы	10 бар/60 дел. шкалы	5 бар/90 дел. шкалы

контакта обрабатываемого материала с плазменной дугой увеличивается, это приводит к большему оплавлению поверхности реза и, как следствие, к искажению профиля (появлению дефекта в виде скругления угла). Эти дефекты снижают точность изготавливаемой детали.

В данной работе рассматривается вариант по минимизации данного дефекта, который заключается в использовании в таких случаях так называемых «петель» (рис. 2). Предполагается, что использование такой траектории резки листового материала должно приводить к снижению времени контакта плазменной дуги с обрабатываемым материалом на углах детали. Это должно снизить вероятность образования дефекта в виде скругления.

#### Описание экспериментальных исследований

Исследования проводились на машине термической резки «Термит ППЛ» на базе установки тонкоструйной плазменной резки HiFocus 130i производства фирмы Kjellberg (ФРГ). Данная машина термической резки позволяет осуществлять раскрой листовых материалов из конструкцион-

ных, нержавеющей сталей, а также сплавов на основе меди и алюминия [8-10].

Исследования проводились при раскрое листового материала стали Ст3 толщиной: 4, 6, 10, 16, 20 мм. В соответствии с рассматриваемой технологией и отмеченными толщинами по рекомендациям завода-изготовителя оборудования были выбраны расходные элементы плазматрона (Таблица 1), режимы обработки (Таблица 2), газы с необходимым давлением и расходом (Таблица 3).

Для каждой разрезаемой толщины материала было проведено 5 опытов, как при резке без использования «петель», так и в случае их использования. Получившиеся радиусы скругления на углах оценивались при помощи измерительного микроскопа Nikon MM - 400.

#### Результаты и обсуждения

Результаты исследований по определению радиусов скругления в зависимости от толщины материала без использования «петель» и с их использованием приведены на рис.3.

Анализируя зависимость, представленную на рисунке 3, при обработке без использования «петель» в траектории движения, можно отметить,



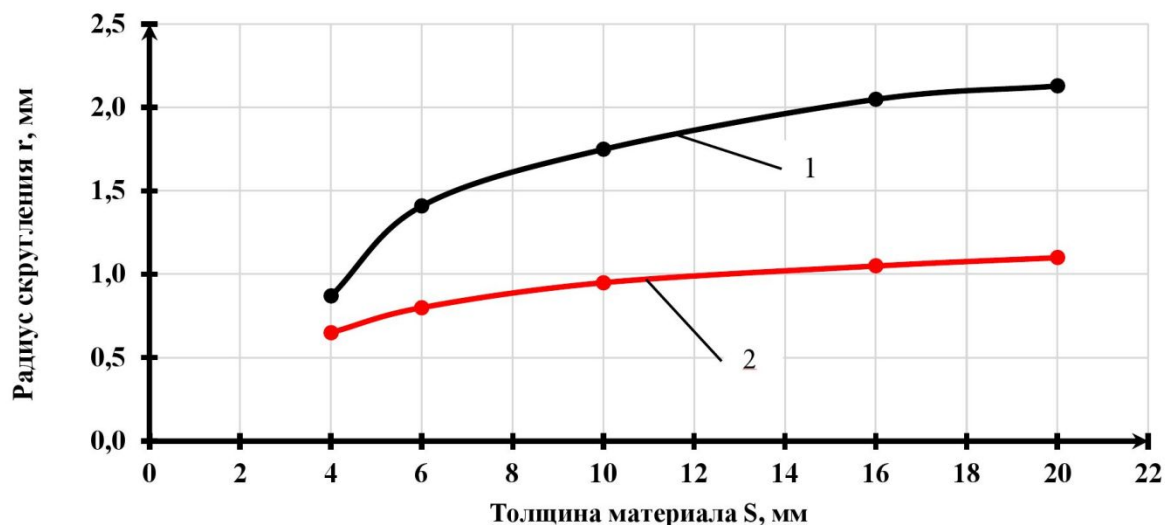


Рис. 3. Значение радиуса скругления в зависимости от толщины материала:

1 – траектория движения без «петель»;

2 – траектория движения с «петлями»

Fig. 3. The value of the radius of rounding, depending on the thickness of the material:

1 – trajectory without loops;

2 – trajectory with loops

что радиус скругления на углах увеличивается с ростом толщины материала. Так для толщины равной 4 мм эта величина составляет 0,87 мм, а для толщины 20 мм – 2,13 мм. Подобная зависимость может быть объяснена следующим образом: с увеличением толщины разрезаемого материала требуется увеличение необходимой плотности мощности. В свою очередь, это приводит к тому, что за одной и тоже время происходит проплавление большего объема материала, что приводит к увеличению скругления кромки реза.

Применение «петель», как показано на рис. 3, не приводит к исчезновению данного дефекта, но позволяет снизить радиус скругления во всем исследуемом диапазоне толщин практически в 2

раза. Так значение радиуса скругления для толщины 6 мм снизилось с 1,41 мм до 0,8 мм, а для толщины 20 мм – с 2,13 мм до 1,1 мм. Снижение значений радиуса скругления происходит за счет того, что смена направления движения за счет применения «петель» исключает участки торможения и разгона, благодаря чему уменьшается время контакта сжатой плазменной дуги с одним и тем же участком материала на углу.

#### Выводы

Использование «петель» в траектории движения на углах при раскрое материала толщиной от 4 до 20 мм тонкоструйной плазменной резкой позволяет уменьшить радиусы скругления до  $2^x$  раз.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полевой Г.В., Сухинин Г.К. Газопламенная обработка металлов. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 336 с.
2. Сухинин Г.К. Резка металлов большой толщины. – М.: Машиностроение, 1983, – 39 с.
3. Полевой Г.В., Сухинин Г.К. Пламенная и газотермическая обработка материалов. – М.: Машиностроение, 1993, – 335 с.
4. Григорьянц А.Г., Соколов А.А. Лазерная резка металлов. – М.: Высшая школа, 1988. – 127 с.
5. Peter Mueller-Hummel, Stefan Ferstl, Marcus Sengotta, Roland Lang. Laser beam welding of high stressed, complex aircraft structural parts, Proc. SPIE 4831, First International Symposium on High-Power Laser Macroprocessing, (3 March 2003); doi: 10.1117/12.497719.
6. Steen W.M. Laser material processing, 3rd ed. – Springer-Verlag London Ltd, London, 2003. – 450 p. doi:10.1007/978-1-4471-3752-8.
7. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки. 2-е изд. – М: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. – 664 с.
8. Ширшов И.Г., Котиков В.Н. Плазменная резка. Л: Машиностроение, 1987. – 192 с.
9. Duley W. Laser Processing and Analysis of Materials. – Springer US, New York, 1983. – 504 p.

doi:10.1007/978-1-4757-0193-7.

10. Handbuch zum Thema Plasmaschneiden [ eine elektronische Ressource] / Werkstatt Ausrüstung Leitner joset. – Salzweg, 2002. – 66 s. – Zugriffsmodus: [https://www.wal-austria.at/cu/wal/pdf/Handbuch\\_Plasmaschneiden\\_web.pdf](https://www.wal-austria.at/cu/wal/pdf/Handbuch_Plasmaschneiden_web.pdf) – Der Titel Bildschirm.

11. Bererziuk M., Lezoh J. Air plasma cutting with ABIPLAS CUT holders manufactured by ABICOR BINZEL // *Welding International*. – 2008. – vol. 22, № 6. – pp. 385-387. doi:10.1080/09507110802280269.

12. Vasil'ev K.V., Chernyak R.V. Examination of plasma-forming additions in oxygen-plasma cutting // *Welding International*. – 1994. – vol. 8, № 11. – pp. 904-908. doi:10.1080/09507119409548719.

13. Salonitis K., Vatsouianos S. Experimental Investigation of the Plasma Arc Cutting Process // *Procedia CIRP*. – 2012. – vol. 3. – pp. 287-292. doi:10.1016/j.procir.2012.07.050.

14. Yahya Hisman Celik. Investigating the Effects of Cutting Parameters on Materials Cut in CNC Plasma // *Materials and Manufacturing Processes*. – 2013. – vol. 28, № 10. – pp. 1053-1060. doi:10.1080/10426914.2013.773015.

15. Milan Kumar Das, Kaushik Kumar, Tapan Kr. Barman, Prasanta Sahoo. 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. – pp. 1550-1559. doi:10.1016/j.mspro.2014.07.342.

16. Schitsin Y.D., Kuchaev P.S., Schitsin V.Y. Plasma cutting of metals with reversed polarity and mixed supply of gases // *Welding International*. – 2013. – vol. 27, № 11. – pp. 890-892. doi:10.1080/09507116.2013.796640.

17. Dashkovskiy S., Narimanyan A. Thermal plasma cutting. Part I: Modified mathematical model // *Mathematical Modelling and Analysis*. – 2007. – vol. 12, № 4. – pp. 441-458. doi:10.3846/1392-6292.2007.12.441-458.

18. Ramakrishnan H., Balasundaram R., Ganesh N., Karthikeyan N. Experimental investigation of cut quality characteristics on SS321 using plasma arc cutting // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. – 2018. – vol. 40. p. 60. doi:10.1007/s40430-018-0997-8.

19. Kirkpatrick, Ian. High definition plasma-an alternative to laser technology // *Aircraft engineering and Aerospace technology*. – 1998. – vol. 70, №3. – pp. 215 - 217.

20. Чиеу Куанг Фи. Исследование эффективности технологии узкоструйной плазменной резки металлов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.08.04 / Санкт-Петербургский государственный морской технический университет. – СПб., 2008. – 26 с.

21. Локтионов А.А., Рахимьянов Х.М., Журавлев А.И. Износ расходных элементов плазматрона при термической резке листового материала // *Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации): материалы докладов II Всероссийской с международным участием научно-технической конференции*. -Иркутск, 2012. -С. 61-65.

22. Локтионов А.А. Оценка качества реза листовых материалов при тонкоструйной плазменной резке//*Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. -2013. -№ 4 (61). -С. 86-91.

23. Рахимьянов Х.М., Локтионов А.А. Особенности формирования кромок при тонкоструйной плазменной резке листового материала // *Инновации в машиностроении: сборник трудов 2 Международной научно-практической конференции*. -Кемерово, 2011. -С. 416-419.

24. 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.

25. Рахимьянов А.Х., Рахимьянов Х.М., Красильников Б.А. Технологические особенности раскрытия биметаллического соединения «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т» при тонкоструйной плазменной резке // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2014 - № 3 (64). – С. 51–67.

## REFERENCES

1. Polevoy G.V., Sukhinin G.K. *Gazoplamennaya obrabotka metallov* [Gas flame processing of metals]. Publishing Center "Academy", 2005. 336 p.
2. Sukhinin G.K. *Rezka metallov bol'shoy tolshchiny* [Cutting of metals of large thickness]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1983, 39 p.
3. Polevoy G.V., Sukhinin G.K. *Plamennaya i gazotermicheskaya obrabotka materialov* [Flame and gas-thermal processing of materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1993, 335 p.
4. Grigor'yants A.G., Sokolov A.A. *Lazernaya rezka metallov* [Laser cutting of metals]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1988, 127 p.
5. Peter Mueller-Hummel, Stefan Ferstl, Marcus Sengotta, Roland Lang. Laser beam welding of high stressed, complex aircraft structural parts, *Proc. SPIE 4831, First International Symposium on High-Power Laser Macroprocessing*, (3 March 2003); doi: 10.1117/12.497719.
6. Steen W.M. *Laser material processing*, 3rd ed. – Springer-Verlag London Ltd, London, 2003. – 450 p. doi:10.1007/978-1-4471-3752-8.

7. Grigor'yants A.G., Shiganov I.N., Misyurov A.I. Tekhnologicheskie protsessy lazernoy obrabotki. [Technological processes of laser processing]. 2nd ed. Moscow, MGTU Publ., 2008, 664 p.
8. Shirshov I.G., Kotikov V.N. Plazmennaya rezka. [Plasma cutting]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1987, 192 p.
9. Duley W. Laser Processing and Analysis of Materials. – Springer US, New York, 1983. – 504 p. doi:10.1007/978-1-4757-0193-7.
10. Handbuch zum Thema Plasmaschneiden [ eine elektronische Ressource ] / Werkstatt Ausrüstung Leitner joset. – Salzweg, 2002. – 66 s. – Zugriffsmodus: [https://www.wal-austria.at/cu/wal/pdf/Handbuch\\_Plasmaschneiden\\_web.pdf](https://www.wal-austria.at/cu/wal/pdf/Handbuch_Plasmaschneiden_web.pdf) – Der Titel Bildschirm.
11. Bererziuk M., Lezoh J. Air plasma cutting with ABIPLAS CUT holders manufactured by ABICOR BINZEL // Welding International. – 2008. – vol. 22, № 6. – pp. 385-387. doi:10.1080/09507110802280269.
12. Vasil'ev K.V., Chernyak R.V. Examination of plasma-forming additions in oxygen-plasma cutting // Welding International. – 1994. – vol. 8, № 11. – pp. 904-908. doi:10.1080/09507119409548719.
13. Salonitis K., Vatousianos S. Experimental Investigation of the Plasma Arc Cutting Process // Procedia CIRP. – 2012. – vol. 3. – pp. 287-292. doi:10.1016/j.procir.2012.07.050.
14. Yahya Hisman Celik. Investigating the Effects of Cutting Parameters on Materials Cut in CNC Plasma // Materials and Manufacturing Processes. – 2013. – vol. 28, № 10. – pp. 1053-1060. doi:10.1080/10426914.2013.773015.
15. Milan Kumar Das, Kaushik Kumar, Tapan Kr. Barman, Prasanta Sahoo. 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. – pp. 1550-1559. doi:10.1016/j.mspro.2014.07.342.
16. Schitsin Y.D., Kuchaev P.S., Schitsin V.Y. Plasma cutting of metals with reversed polarity and mixed supply of gases // Welding International. – 2013. – vol. 27, № 11. – pp. 890-892. doi:10.1080/09507116.2013.796640.
17. Dashkovskiy S., Narimanyan A. Thermal plasma cutting. Part I: Modified mathematical model // Mathematical Modelling and Analysis. – 2007. – vol. 12, № 4. – pp. 441-458. doi:10.3846/1392-6292.2007.12.441-458.
18. Ramakrishnan H., Balasundaram R., Ganesh N., Karthikeyan N. Experimental investigation of cut quality characteristics on SS321 using plasma arc cutting // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. – 2018. – vol. 40, p. 60. doi:10.1007/s40430-018-0997-8.
19. Kirkpatrick, Ian. High definition plasma-an alternative to laser technology // Aircraft engineering and Aerospace technology. – 1998. – vol. 70, №3. – pp. 215 - 217.
20. Chieu Kuang Fi. Issledovanie effektivnosti tekhnologii uzkostruynoy plazmennoy rezki metallov: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk: [Research on efficiency of high precision plasma cutting of metals technology]. Sankt-Peterburg, 2008, 26 p.
21. Loktionov A.A., Rahimjanov H.M., Zhuravlev A.I. Iznos rashodnykh jelementov plazmotrona pri termicheskoj rezke listovogo materiala [Wear of consumable elements plasmatron at thermal cutting of a sheet material]. Zhiznennyj cikl konstrukcionnykh materialov (ot polucheniya do utilizacii): materialy dokladov II Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii (s mezhdunarodnym uchastiem [The life cycle of construction materials (from fabrication to utilization): Proceedings of the 2nd All-Russian scientific and technical Conference (with international participation)]. Irkutsk, ISTU, 2012, pp. 61-65.
22. Loktionov A.A. Otsenka kachestva reza listovykh materialov pri tonkostruinoi plazmennoi rezke [Assessment a cut of quality of sheet materials in the conditions of high-precision plasma cutting]. Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science, 2013, no. 4 (61), pp. 86–91.
23. Rakhimyanov Kh.M., Loktionov A.A. Osobennosti formirovaniya kromok pri tonkostruynoy plazmennoy rezke listovogo materiala [Features of edge formation with high-precision plasma cutting of sheet material]. Innovatsii v mashinostroenii: sbornik trudov 2 Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Innovations in mechanical engineering: a collection of works of the 2nd International Scientific and Practical Conference]. Kemerovo, 2011, pp. 416-419.
24. 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.
25. Rakhimyanov A.Kh., Rakhimyanov Kh.M., Krasil'nicov B.A. Tekhnologicheskie osobennosti raskroya bimetallicheskoego soedineniya "stal' St3 + stal' 12X18H10T" pri tonkostruinoi plazmennoi rezke [Technological features of the bimetallic joints "steel Ст3 + steel 12X18H10T" layout by high-precision plasma cutting]. Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science, 2014, no. 3 (64), pp. 51–67.