ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

УДК 621.791.94

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-2-48-53>ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАЗМЕННО-ДУГОВОЙ РЕЗКИ
НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ 09Г2СМихайлицын С.В.¹, Шекшеев М.А.¹, Аюбашев О.М.¹, Стеблянко В.Л.¹, Федосеев С.А.²¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия² Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия**Аннотация**

Плазменная дуга является мощным, прогрессивным инструментом для обработки различных материалов. Одним из основных направлений обработки материалов является их резка и раскрой. В данной статье решается актуальная проблема выбора рациональных технологических режимов плазменно-дуговой резки низколегированной стали марки 09Г2С. Данная сталь нашла широкое применение при производстве различных сварных металлоконструкций. В работе определены факторы, которые напрямую влияют на качество реза. Проведены исследования влияния технологических параметров плазменно-дуговой резки на формировании структуры и свойств зоны термического влияния и характер микрогеометрии поверхности реза. Показано, что металл зоны термического влияния при различных режимах плазменно-дуговой резки характеризуется наличием мартенсита с твердостью 325–340 HV. При этом качественный состав структуры в широких пределах технологических параметров не изменяется. Повышение тока с 220 до 280 А при постоянном напряжении привело к увеличению ширины реза и, как следствие, оказало существенное влияние на микрогеометрию поверхности реза вследствие более интенсивного истечения продуктов расплава стали из канала реза. Шероховатость поверхности реза R_a изменяется от 0,4661 до 2,7811 мкм, а волнистость R_z – от 2,9360 до 13,1519 мкм. На основании полученных результатов предложены рациональные режимы плазменно-дуговой резки проката толщиной 12 мм из низколегированной стали 09Г2С, обеспечивающие формирование требуемого комплекса свойств. Применение рациональных технологических режимов позволяет получить почти параллельные кромки реза с минимальным значением шероховатости. Тем самым минимизируются затраты на дальнейшую обработку деталей.

Ключевые слова: плазменная резка, низколегированная сталь, зона термического влияния, скорость охлаждения, закалка, мартенсит, микрогеометрия, шероховатость, волнистость.

Введение

Развитие машиностроения и металлургии в современных условиях предъявляет все более жесткие требования к технологиям обработки конструкционных материалов [1–4]. Одним из основных направлений обработки конструкционных материалов являются их резка и раскрой. В последние десятилетия одним из способов термической резки, которые получили широкое распространение, является плазменно-дуговая резка [5].

Сущность процесса плазменно-дуговой резки состоит в расплавлении высокотемпературным потоком газов металла в ограниченном объеме с последующим удалением расплава из полости реза струей [6].

Параметры качества реза зависят от технологических режимов резки. При оптимальных режимах можно получить почти параллельные кромки реза с минимальной шероховатостью, тем самым минимизируя затраты на дальнейшую обработку деталей.

Наибольшее применение при производстве различных металлоконструкций получила низколегированная сталь марки 09Г2С.

Целью работы является выбор рациональных режимов плазменно-дуговой резки низколегированной конструкционной стали марки 09Г2С.

Материалы и методы исследования

Плазменно-дуговую резку проката толщиной 12 мм из стали 09Г2С (табл. 1, 2) выполняли с помощью портальной машины «Кристалл – 2,5» при различных технологических режимах. В качестве режущего газа использовался воздух под

давлением 5 бар и расходом 30 условных единиц шкалы прибора.

В состоянии поставки структура исследуемой стали представляет собой зеренный феррит с включениями строчечного перлита (**рис. 1**), твердость Виккерса 173 HV.

Параметры термического цикла металла зоны термического влияния (ЗТВ) рассчитывали по методике Н.Н. Рыкалина для действия мощного быстро движущегося точечного источника теплоты в тонкой пластине [7]:

$$\omega = -2\pi\lambda c_p \frac{(T - T_n)^3}{[q / v\delta]^3}, \quad (1)$$

где ω – скорость охлаждения, °C/с; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(см·°C); c_p – объемная теплоемкость, Дж/(см³·°C); v – скорость резки, см/с; δ – толщина материала, см; T – рассматриваемая температура, °C; T_n – начальная температура, °C; q – эффективная мощность источника теплоты, Вт.

Таблица 1
Химический состав стали марки 09Г2С [8], %

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	N	Cu
<0,12	0,5–0,8	1,3–1,7	<0,3	<0,04	<0,035	<0,3	<0,008	<0,3

Таблица 2
Механические свойства стали 09Г2С при T=20°C [8]

Состояние поставки	Толщина, мм	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Временное сопротивление σ_B , МПа	Относительное удлинение δ_5 , %
Листы и полосы (образцы поперечные)	12	325	470	21

Рассматриваемые режимы плазменно-дуговой резки

Сила тока I , А	Напряжение U , В	Скорость резки v , см/с	Кэфф. теплопроводности λ , Вт/(см·°C)	Объемная теплоемкость c_p , Дж/(см ³ ·°C)	Толщина материала δ , см	КПД η , %	Рассматриваемая температура T , °C	Начальная температура T_n , °C	Эффективная мощность источника теплоты q , Вт	Мгновенная скорость охлаждения ω , °C/с
220	190	6,4	0,42	5	1,2	0,65	550	20	27170	156,87
230									28405	143,53
240									29640	131,82
250									30875	121,48
260									32110	112,32
280									34580	96,85

Металлографические исследования выполняли на травленных образцах с помощью светового микроскопа Meiji Techno с применением системы компьютерного анализа изображений Thixomet Pro.

Твердость металла ЗТВ измеряли по методу Виккерса согласно ГОСТ 2999-75 на твердомере HV-1000 [9].

Исследования микрогеометрии поверхности реза выполняли с помощью профилометра MarSurf XR 20 с программой анализа микро-рельефа поверхности XT 20 в соответствии с ГОСТ 14792-80 [10].

Рис. 1. Структура стали 09Г2С в состоянии поставки, $\times 200$

Результаты исследования и их обсуждение

Ключевым фактором при формировании структуры и свойств ЗТВ является скорость охлаждения. Одним из основных параметров технологического режима, которые оказывают существенное влияние на скорость охлаждения, является сила тока. Из результатов расчета видно (**табл. 3, рис. 2**), что при резке проката толщиной 12 мм на токе 220–280 А скорость охлаждения изменяется от 156,87 до 96,85°C/с.

Таблица 3

Рис. 2. Зависимость скорости охлаждения от силы тока при резке проката толщиной 12 мм

Металлографический анализ ЗТВ образцов, выполненных на режимах: 1) $I = 220$ А, $U = 190$ В, $V = 6,4$ см/с и 2) $I = 280$ А, $U = 190$ В, $V = 6,4$ см/с, показал, что структура ЗТВ претерпела существенные изменения (рис. 3, 4). Структура характеризуется наличием мартенсита в виде

глобулярных и строчечных скоплений, при этом твердость составляет 325–340 НВ. Ширина ЗТВ порядка 500–600 мкм, при этом разделение на характерные структурные участки не наблюдается.

Таким образом, исследование структуры металла ЗТВ при различных режимах плазменно-дуговой резки показало, что качественный состав структуры в широких пределах технологических параметров не изменяется. Поэтому качество реза целесообразно оценивать по критерию микрогеометрии поверхности.

Неблагоприятные условия истечения продуктов расплава стали из канала реза определяют качество его поверхности, что выражается уровнем шероховатости R_a и характером микрогеометрии. Результаты исследований микрогеометрии приведены на рис. 5, 6 и табл. 4.

а
×100

б
×200

Рис. 3. Структура ЗТВ стали 09Г2С после резки на режиме 1: феррит (светлые участки) и мартенсит (темные участки)

а
×100

б
×200

Рис. 4. Структура ЗТВ стали 09Г2С после резки на режиме 2: феррит (светлые участки) и мартенсит (темные участки справа)

Рис. 5. Топограмма поверхности реза стали 09Г2С при раскрое на режиме 1

Рис. 6. Топограмма поверхности реза стали 09Г2С при раскрое на режиме 2

Таблица 4

Результаты измерений микрогеометрии поверхности реза

Но- мер ре- жима	R_a , мкм	R_q , мкм	R_z , мкм	R_{Sm} , мкм	R_{Sk}	R_{Ku}	R_{Pc} (0,50,- 0,50), 1/см
1	0,4661	0,5977	2,9360	138,7814	0,289	3,472	34
2	2,7811	3,4706	13,1519	407,7694	0,180	2,561	28

Сравнительный анализ экспериментальных данных показал значительную разницу уровня шероховатости поверхности реза на режимах 1 и 2 примерно в 6,5 раз.

Из чего следует, что рост тока дуги при постоянном напряжении ведет к увеличению ширины реза и, как следствие, оказывает более интенсивное влияние на истечение продуктов расплава стали из канала реза.

Выводы

Таким образом, в работе проведены комплексные исследования влияния технологических параметров режима плазменно-дуговой резки на каче-

ство проката толщиной 12 мм из низколегированной стали 09Г2С. На основе проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Исследования металла ЗТВ при различных режимах плазменно-дуговой резки показало, что его структура характеризуется наличием мартенсита с твердостью 325–340 HV. При этом качественный состав структуры в широких пределах технологических параметров не изменяется.

2. Рост тока с 220 до 280 А при постоянном напряжении ведет к увеличению ширины реза и, как следствие, оказывает существенное влияние на микрогеометрию поверхности реза вследствие более интенсивного истечения продуктов расплава стали из канала реза. Так, шероховатость R_a изменяется от 0,4661 до 2,7811 мкм, а волнистость R_z – от 2,9360 до 13,1519 мкм.

3. На основе результатов проведенных исследований можно предложить следующие рациональные значения эффективной тепловой мощности для резки проката толщиной 12 мм из стали 09Г2С: $q = 27,1$ – $29,64$ кВт.

Список литературы

1. Формирование структуры и свойств зоны сплавления при плазменно-порошковой наплавке покрытия типа 250Х15Г20С / Емелюшин А.Н., Петроченко Е.В., Неведьев С.П., Морозов А.Н. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2011. № 3. С. 70–73.
2. Исследование формирования структуры многослойных сварных соединений трубной стали / Емелюшин А.Н., Шекшеев М.А., Окулова А.А., Пупейко А.А. // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2012. Т. 1. С. 242–246.
3. Емелюшин А.Н., Беляев А.И., Шекшеев М.А. Современные методы выбора рациональных параметров режима сварки низколегированных сталей // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2012. Т. 2. С. 163–165.
4. Особенности формирования структуры и свойств сварных соединений стали класса прочности К56 при дуговой сварке / Емелюшин А.Н., Сычков А.Б., Завалишин А.Н., Шекшеев М.А. // Черные металлы. 2013. № 8. С. 18–22.
5. Ширшов И.Г., Котиков В.Н. Плазменная резка. Л.: Машиностроение, 1987. 192 с.
6. Полевой Г.В., Суханин Г.К. Газопламенная обработка металлов: учебник для студентов учреждений сред. проф. образования. М.: Академия, 2005. 336 с.
7. Теория сварочных процессов: учебник для вузов / Волченко Н.В., Ямпольский В.М., Винокуров В.А. и др.; под ред. Фролова В.В. М.: Высш. шк., 1988. 559 с.
8. Марочник сталей и сплавов / Сорокин В. Г., Волосникова А.В., Вяткин С.А. и др. М.: Машиностроение, 1989. 640с.
9. Лившиц Л.С., Хакимов А.Н. Металловедение сварки и термическая обработка сварных соединений. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1989. 336 с.
10. Табенкин А.Н., Тарасов С.Б., Степанов С.Н. Шероховатость, волнистость, профиль. Международный опыт / под ред. канд. техн. наук Табачниковой Н.А. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. 136 с.

Поступила 25.05.15.

Принята в печать 20.04.17.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-2-48-53>

PLASMA CUTTING OF THE LOW ALLOY STEEL GRADE OF 09G2S

Sergey V. Mikhaylitsyn – Ph.D. (Eng.), Associate Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: svmikhaylitsyn@mail.ru. Phone: +7 (3519) 29 84 80.

Maksim A. Sheksheev – Ph.D. (Eng.), Senior Lecturer

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: sheksheev@yandex.ru

Oleg M. Ayubashev – Undergraduate Student

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: aubashev1992@mail.ru

Valery L. Steblyanko – D.Sc. (Eng.), Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Sergei A. Fedoseev – D.Sc. (Eng.), Professor

Perm State National Research Polytechnic University, Russia. E-mail: fsa@gelicon.biz

Abstract

Plasma arc is a powerful advanced tool used for processing of various materials. One of the main techniques used in material processing includes cutting. This article looks at an important issue of finding efficient plasma-arc cutting techniques for processing of the low alloy steel grade of 09G2S. This steel grade is widely used to make fabricated assemblies for various applications. The research helped identify the factors that directly affect the quality of the cut. A study has been carried out to determine the relationship between the plasma cutting technique applied and the structure and the properties of the heat affected zone and the microgeometry of the cut surface. It is shown that martensite with the hardness of 325 to 340 HV appears to be present in the metal of the heat affected zone at different plasma cutting conditions. At the same time there appears to be no impact on the structural composition within a wide range of process parameters. The current increase from 220 to 280A at a constant voltage resulted in a wider cut and produced

a considerable impact on the microgeometry of the cut surface due to an intensified removal of the molten metal from the cutting channel. The surface roughness R_a of the cut may vary from 0.4661 to 2.7811 μm , with the waviness R_z varying from 2.9360 to 13.1519 μm . Based on the results obtained efficient plasma cutting techniques have been proposed for a 12 mm rolled material made from the low alloy steel grade of 09G2S, which can ensure the desired combination of properties. The use of efficient plasma cutting techniques enables to obtain cutting edges that are almost parallel and have minimum roughness thus minimizing the cost of downstream processing.

Keywords: Plasma cutting, low alloy steel, heat affected zone, cooling rate, tempering, martensite, microgeometry, roughness, waviness.

References

1. Emelyushin A.N., Petrochenko E.V., Nefediev S.P., Morozov A.N. The structure and the properties of the 250Kh15G20S coating in the

- fusion zone under plasma transferred arc hardfacing conditions. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2011, no. 3, pp. 70–73. (In Russ.).
2. Emelyushin A.N., Sheksheev M.A., Okulova A.A., Pupeyko A.A. Study of the multilayer structure of welded joints on steel pipes. *Aktualnye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya* [Important problems of modern science, technology and education], 2012, vol. 1, pp. 242–246. (In Russ.).
 3. Emelyushin A.N., Belyaev A.I., Sheksheev M.A. Modern methods for selecting proper welding parameters for low alloy steels. *Aktualnye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya* [Important problems of modern science, technology and education], 2012, vol. 2, pp. 163–165. (In Russ.).
 4. Emelyushin A.N., Sychkov A.B., Zavalishin A.N., Sheksheev M.A. The structure and the properties of arc welded joints in K56 steel. *Chemye metally* [Ferrous metals], 2013, no. 8, pp. 18–22. (In Russ.).
 5. Shirshov I.G., Kotikov V.N. *Plazmennaya rezka* [Plasma cutting]. L.: Mashinostroenie, 1987, 192 p. (In Russ.).
 6. Polevoy G.V., Sukhanin G.K. *Gazoplazmennaya obrabotka metallov: Uchebnyk dlya studentov uchrezhdeniy sred. prof. obrazovaniya* [Flame machining of metals: Textbook for vocational school students]. Moscow: Akademiya, 2005, 336 p. (In Russ.).
 7. Volchenko N.V., Yampolsky V.M., Vinokurov V.A. et al. *Teoriya svarochnykh protsessov: Ucheb. dlya vuzov so spets. "Oborudovanie i tekhnologiya svarochnogo proizvodstva"* [Theory of welding processes: Textbook for universities specializing in welding]. Ed. by Frolov V.V. Moscow: Vysshaya Shkola, 1988, 559 p. (In Russ.).
 8. Sorokin V.G., Volosnikova A.V., Vyatkin S.A. et al. *Marochnik staley i splavov* [Steel grade guide]. Moscow: Mashinostroenie, 1989, 640 p. (In Russ.).
 9. Livshits L.S., Khakimov A.N. *Metallovedenie svarki i termicheskaya obrabotka svarnykh soedineniy* [Metals for welding and heat treatment of welds]. 2nd edition, revised. Moscow: Mashinostroenie, 1989, 336 p. (In Russ.).
 10. Tabenkin A.N., Tarasov S.B., Stepanov S.N. *Sherokhovatost', volnistost', profil'. Mezhdunarodniy opyt* [Roughness, waviness, profile. International expertise]. Ed. by Tabachnikova N.A., Ph.D. (Eng.). Saint Petersburg: Publishing House of Saint Petersburg Polytechnic University, 2007, 136 p. (In Russ.).

Received 25/05/15

Accepted 20/04/17

Образец для цитирования

Исследование плазменно-дуговой резки низколегированной стали 09Г2С / Михайлицын С.В., Шекшеев М.А., Аюбашев О.М., Стеблянка В.Л., Федосеев С.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т.15. №2. С. 48–53. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-2-48-53>

For citation

Mikhaylitsyn S.V., Sheksheev M.A., Ayubashev O.M., Steblyanko V.L., Fedoseev S.A. Plasma Cutting of the Low Allow Steel Grade of 09G2S. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2017, vol. 15, no. 2, pp. 48–53. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-2-48-53>