

С. В. Анахов¹, Б. Н. Гузанов¹, И. Ю. Матушкина²

S. V. Anakhov, B. N. Guzanov, I. Yu. Matuskina

¹ФГАОУ ВО «Российский государственный профессионально-педагогический университет», Екатеринбург

²ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», Екатеринбург

¹Russian State Vocational Pedagogical University, Ekaterinburg

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

sergej.anahov@rsvpu.ru

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КАЧЕСТВА РЕЗКИ МЕТАЛЛОВ ГИДРОАБРАЗИВНЫМ, ЛАЗЕРНЫМ И ПЛАЗМЕННЫМ МЕТОДАМИ*

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE QUALITY OF METAL CUTTING BY WATERJET, LASER AND PLASMA METHODS

Аннотация. Представлены результаты экспериментального исследования технологий гидроабразивной, лазерной и плазменной резки, обеспечивающих высокое качество реза. По результатам качественного и количественного анализа отдельных параметров качества реза сделан вывод о наилучшем качестве, достигаемом при резке плазматроном ПМВР-5.3, разработанном в авторском коллективе, и возможности плазменной резки под сварку без последующей механической обработки.

Abstract. The results of an experimental study of waterjet, laser and plasma cutting technologies that ensure high cutting quality are presented. Based on the results of qualitative and quantitative analysis of individual cutting quality parameters, it was concluded that the best quality achieved when cutting with the PMVR-5.3 plasma torch, developed in the author's team, and the possibility of plasma cutting for welding without subsequent mechanical processing.

Ключевые слова: плазматрон; лазерная резка; качество; эффективность; воздушно-плазменная резка; гидроабразивная резка; электронно-лучевые технологии.

Keywords: plasma torch; laser cutting; quality; efficiency; air plasma cutting; water jet cutting; electron beam technologies.

Разделка металлов – одна из необходимых операций в заготовительных и ремонтных технологиях, включая подготовку кромок деталей для их сварки [1]. Для осуществления данной операции возможно применение нескольких методов резки, включая высокоэнергетические технологии – электронно-лучевую, газовую, гидроабразивную, лазерную и плазменную разделку. Как показал проведенный ранее авторами анализ [2], существующие в настоящий момент регламентные нормы на качество резки с использованием таких технологий зачастую опираются на выводы, полученные в конце XX века, и не

*Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 23-29-00111

учитывают появления новых высокоэффективных устройств и технологий, позволяющих производить резку с высоким качеством и эффективностью, включая последующее производство сварных соединений. Следует также обратить внимание на отсутствие четких критериев выбора среди широкого спектра подобных технологий (не следует забывать также о механической резке) при разделке металла конкретного сортамента и толщины. Фактически, задача оценки свойств разделочных швов, влияющих на качество последующих сварных соединений, становится многофакторным исследованием, требующим учета широкого спектра имеющихся нормативных требований [2] и ряда других важных параметров и технологических факторов. При этом следует учесть, что набор требований к свойствам разделочных швов, для разных технологий существенно различается, из-за чего при проведении сравнительных исследований целесообразно опираться на универсальные качественные и количественные критерии, определение которых не требует длительных и ресурсозатратных испытаний.

Для реализации упомянутой выше цели авторами были произведены исследования нескольких известных методов высокоэнергетического воздействия на материалы [3; 4]. В табл. 1 представлен качественный сравнительный анализ ряда термических (лазерной, плазменной и газовой), а также нетермических (гидроабразивной и вырубки/высечки) видов резки металлов. По результатам данного анализа можно сделать вывод, что на малых толщинах металла (до 15 мм) предпочтительнее использовать узкоструйную плазменную и лазерную резку. На толщинах металла до 100 мм плазменная резка является приоритетной, так как по сравнению с газовой резкой она дает в совокупности с высокой производительностью лучшее качество вырезаемых заготовок.

В рамках решения задач данного исследования авторами был проведен экспериментальный анализ качества резки, выполненной в однотипных условиях – на стали 09Г2С толщиной 16 мм под сварку (для последующего производства сварных соединений) гидроабразивным, лазерным и плазменным способом резки.

Гидроабразивная резка была осуществлена на станке HEAD 3020BA-5AC, лазерная – на лазерном комплексе Trumpf Trulaser 5030 Classic (мощность 6 кВт, CO₂) в Региональном центре лазерных технологий, г. Екатеринбург (далее – РЦЛТ), плазменная – с применением плазмотронов ПМВР-5.3 (разработка ООО НПО «Полигон» [5]) и YK200H (двухконтурный плазмотрон производства HUAYUAN FLG-400HD, Китай) на базе ООО НПО «Полигон» и ФГАОУ ВО «РГППУ». Плазмотрон ПМВР-5.3 (рис. 1) представляет собой одноконтурный узкоструйный плазмотрон 5-го поколения с новой системой газовыхревой стабилизации (ГВС) плазменной дуги.

Таблица 1

Сравнительная оценка различных способов резки

Критерии	Технологии разделки металлов					
	Термические				Нетермические	
	Лазерная	Плазменная		Газовая	Гидро-абразивная	Вырубка и высечка
		Узкоструйная	Прецизионная			
Подготовка	Требуется удаление окалины и ржавчины	Не требуется				
Основной процесс	Очень высокая концентрация энергии	Очень высокая концентрация энергии	Высокая концентрация энергии	Большой теплоотвод	Тепловыделение отсутствует	Упрочняющая резка
Последующая обработка	Не требуется (на толщинах до 12 мм)	Не требуется при толщине до 30 мм (160 А)	Не требуется при толщине до 25 мм (250 А)	Требуется рихтовка и удаление заусенцев	Не требуется	Требуется удаление заусенцев
Точность	Очень высокая	Очень высокая/ высокая	Высокая/ средняя	Достаточная	Очень высокая	Средняя / высокая
Деформация	Малая	Малая	Малая	Большая	Без коробления	Без коробления
Материал	Конструкционная и высоколегированная сталь, алюминий (тонколистовой), цветные металлы	Конструкционная и высоколегированная сталь, алюминий, медь, чугун, плакированный и специальный металл	Конструкционная и высоколегированная сталь, алюминий, медь, чугун, плакированный и специальный металл	Конструкционная сталь	Конструкционная и высоколегированная сталь, алюминий, медь, чугун	Конструкционная и высоколегированная сталь (тонкая), алюминий, медь
Толщина листа (в стандартном диапазоне)	0,5...12 мм	0,5...30 мм	5...60 (160) мм	10...500 мм	0,5...12 мм	Менее 8 мм
Экономическая эффективность	Высокая	Очень высокая	Высокая	Средняя (только для конструкционной стали)	Малая	Средняя (высокая стоимость инструмента)

В системе ГВС используется симметричный ввод плазмобразующего газа (далее – ПОГ) в систему деления потока с последующей подачей ПОГ в газодинамический стабилизатор потока, который состоит из газоподводящего, газоформирующего и газовихревого участков, использующих два за-

вихрителя (формирующий и стабилизирующий) с переменным числом каналов завихрения.



Рис. 1. Плазмоторн ПМБР-5.3
для прецизионной воздушно-плазменной резки металлов

Эксперименты были проведены в соответствии с режимами, выбранными с учетом требований технологических карт оборудования для стали 09Г2С данной толщины и указаны в табл. 2, в которой приведены и фото полученных образцов резки.

Таблица 2

Режимы резки и образцы реза, полученные различными видами резки

Вид резки	Режим резки	Образцы реза
Гидроабразивная резка	$V = 130 \text{ мм/мин}$	
Лазерная резка (под сварку)	$N = 1,7 \text{ кВт},$ $f = 2 \text{ кГц},$ $V = 600 \text{ мм/мин},$ $P = 0,6 \text{ бар}$	
Воздушно-плазменная резка (ПМБР-5.3)	$I = 175 \text{ А},$ $U = 137 \text{ В},$ $V = 1500 \text{ мм/мин},$ $D_{\text{сопла}} = 1,9 \text{ мм},$ $\text{РПОГ} = 4,5 \text{ атм}$	
Воздушно-плазменная резка (УК200Н)	$I = 175 \text{ А},$ $U = 155 \text{ В},$ $V = 1500 \text{ мм/мин},$ $D_{\text{сопла}} = 1,9 \text{ мм}$	

В табл. 3 представлены результаты визуального исследования разделочных швов. При исследовании обращалось внимание на наличие грата, капель и цветов побежалости, а также на появление осцилляций (изменение линейности микронеровностей на поверхности реза, обусловленное уменьшением энергетической мощности по глубине реза и несовпадением скоростей формирования углубления и перемещения источника) и отклонения от вертикали кромок реза. Как видно из табл. 3, представленный для анализа плазмоторн ПМБР-5.3, показал наилучшее сочетание признаков, характеризующих высокое качество реза.

Таблица 3

Качество реза, полученное различными видами резки

Вид резки	Внешние признаки качества реза				
	Грат	Осцилляция	Угол отклонения	Капли	Цвета побежалости
Гидро-абразивная резка	Отсутствует	Присутствует на 2/3 реза	Присутствует	Отсутствуют	Отсутствуют
Лазерная резка (под сварку)	Грат на выходе	Присутствует по всей длине	Визуально отсутствует	Отсутствуют	Отсутствуют
Воздушно-плазменная резка (ПМВР-5.3М)	Небольшой грат на выходе	Присутствует небольшая на выходе	Присутствует небольшой	Отсутствуют	Отсутствуют
Воздушно-плазменная резка (УК200Н)	Грат на выходе	Присутствует 2/3 реза	Присутствует	Отсутствуют	Отсутствуют

В дополнение к результатам визуального анализа было проведено исследование параметров микрорельефа поверхности с помощью измерителя шероховатости, профилометра TR200. Результаты измерения параметров микрорельефа, сделанные в центральной части полученных поверхностей реза на базовой длине 2,5 мм, представлены в табл. 4 и 5.

Таблица 4

Параметры микрорельефа поверхности резов, полученных различными видами резки

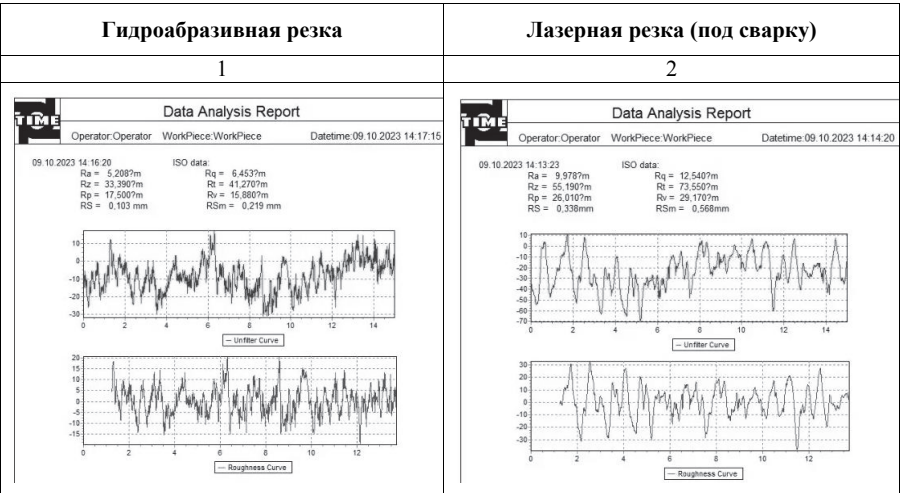




Таблица 5

Параметры шероховатости* поверхности резов,
полученных различными видами резки

Вид резки	Параметры шероховатости, мкм					
	Rz	Ra	Rp	Нормы Rz для классов по ГОСТ 14972–80 для плазменно-дуговой резки металла толщиной 13–30 мм		
				1	2	3
Гидроабразивная резка	33,4	5,21	17,5	60	200	320
Лазерная резка (под сварку)	55,2	9,98	26,0			
Воздушно-плазменная резка (ПМБР-5.3М)	10,7	1,54	5,0			
Воздушно-плазменная резка (УК200Н)	34,9	2,60	12,0			

*Rz – наибольшая высота (сумма высоты наибольшего выступа и глубины наибольшей впадины) профиля; Ra – среднее арифметическое из абсолютных значений отклонений профиля; Rp – высота самой высокой точки на поверхности; все значения измерены в пределах базовой длины 2,5 мм.

Для подтверждения вывода о высоком качестве реза достигнутого с применением плазмотрона ПМВР-5.3 было проведено дополнительное исследование параметров шероховатости в различных зонах поверхности разделочного шва (рис. 2). Результаты измерений представлены в табл. 6.



Рис. 2. Схема измерений параметров шероховатости поверхности реза, полученных плазменной резкой плазмотроном ПМВР-5.3

Таблица 6

Параметры шероховатости поверхности реза, полученного плазменной резкой плазмотроном ПМВР-5.3

Зона измерения	Параметры шероховатости, мкм		
	Rz	Ra	Rp
1	21,89	2,92	9,77
2	14,35	2,22	7,33
3	16,77	2,47	7,30
4	24,50	3,95	12,24
5	17,76	2,63	7,14

По результатам анализа представленных в табл. 5 и 6 можно сделать вывод о высоком качестве реза (на уровне 1 класса по ГОСТ 14972–80), достигаемом с применением современных высокоэнергетических технологий. При этом, наилучшее качество по сравнению иными технологиями резки и применяемым оборудованием было достигнуто при резке плазмотроном ПМВР-5.3, что подтверждает сделанные ранее выводы [2] как о высоком качестве и прецизионности осуществляемой с его применением резки конструкционной стали, так и о возможности его использования для получения разделочных швов при производстве сварных соединений без последующей механической обработки в пределах толщин до 20 мм. В данном случае в качестве прецизионности можно принять комплекс исследованных в данной работе параметров, а также ширину реза и зоны термического влияния, значения которых регламентированы ГОСТ 14972–80 [6]. Отдельное внимание заслуживает экспериментальный вывод о преимуществе плазменной резки конструкционной стали указанной толщины над лазерной, несмотря на показанное более высокое качество лазерной резки по сравнению с известными данными [7]. По результатам данного исследования можно сделать вывод о широком спектре возможностей технологий высокоэнергетической резки металлов, позволяющих решать большинство задач, требующих высокопро-

изводительной и качественной резки металлов вне рамок регламентных ограничений, снижающих эффективность их применения.

Список литературы

1. Кайдалов, А. А. Современные технологии термической и дистанционной резки конструкционных материалов / А. А. Кайдалов. – Киев: Экотехнология, 2007. – 456 с.
2. Анахов, С. В. Об изменении регламентных норм при производстве сварных соединений с применением плазменной прецизионной «финишной» резки металлов / С. В. Анахов, И. Ю. Матушкина, А. В. Матушкин // Техническое регулирование в едином экономическом пространстве: сборник статей X Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Екатеринбург, 18 мая 2023 г.; ФГАОУ ВО «РГППУ». – Екатеринбург, 2023. – С. 77–86.
3. Аверьянова, И. О. Технология машиностроения. Высокоэнергетические и комбинированные методы обработки: учебное пособие / И. О. Аверьянова, В. В. Клепиков. – Москва: ФОРУМ, 2022. – 304 с. – ISBN 978-5-91134-268-5.
4. Солоненко, О. П. Высокоэнергетические процессы обработки материалов / О. П. Солоненко, А. П. Алхимов, В. В. Марусин [и др.]; отв. ред. акад. РАН М. Ф. Жуков, чл.-корр. РАН В. М. Фомин. – Новосибирск: Наука, 2000. – 425 с. – ISBN 5-02-031528-1.
5. Патент № 2754817 Российская Федерация, МПК B23K 10/00 (2006.01), H05H 1/26 (2006.01), F23D 14/42 (2006.01). Плазмотрон: № 2021107721: заявл. 24.03.2021: опубл. 07.09.2021 / Пыкин Ю. А., Анахов С. В., Матушкин А. В.; заявитель ООО НПО «Полигон».
6. Anakhov, S. V. Development of Equipment and Technology for Precision Air-Plasma Cutting of Plate Steel / S. V. Anakhov, B. N. Guzanov, A. V. Matushkin. – DOI: 10.3103/S096709122201003X // Steel in Translation. – 2022. – Vol. 52. – № 1. P. 19–26.
7. Евтихеев, Н. Н. Лазерные технологии: учебное пособие / Н. Н. Евтихеев, О. Ф. Очин, И. А. Бегунов. – Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2020. – 240 с.

УДК 621.315.5-419.4

Е. И. Докучаев, Г. Н. Мигачева

E. I. Dokuchaev, G. N. Migacheva

ФГАОУ ВО «Российский государственный профессионально-педагогический университет», Екатеринбург

Russian State Vocational Pedagogical University, Ekaterinburg

dokuhaiev20@mail.ru; galnic42@gmail.com

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЧЕТЫРЕХ ЗОНДОВОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ АНАЛИЗА ПРОВОДИМОСТИ МАТЕРИАЛОВ

USING A FOUR PROBE SETUP TO ANALYZE THE CONDUCTIVITY OF MATERIALS

Аннотация. Учитывая уникальные свойства данных материалов и их широкое применение в различных отраслях, оценка теплофизических характеристик является критически важной для разработки новых технологий и материалов. В статье рассмот-