



# Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



## Оценка технологических схем тонкоструйной плазменной резки металлических материалов и их композиций

Харис Рахмиев<sup>a, \*</sup>, Александр Локтионов<sup>b</sup>, Андрей Рахмиев<sup>c</sup>, Надежда Гаар<sup>d</sup>

Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

<sup>a</sup> <http://orcid.org/0000-0003-2781-0225>, [kharis51@mail.ru](mailto:kharis51@mail.ru), <sup>b</sup> <http://orcid.org/0000-0003-1168-6688>, [pushkin-lok@mail.ru](mailto:pushkin-lok@mail.ru),  
<sup>c</sup> <http://orcid.org/0000-0003-3805-0874>, [centerfht@mail.ru](mailto:centerfht@mail.ru), <sup>d</sup> <http://orcid.org/0000-0001-8517-658X>, [lianelas@mail.ru](mailto:lianelas@mail.ru)

### ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9.01; 621.791.947.55

#### История статьи:

Поступила: 14 марта 2018  
Рецензирование: 30 марта 2018  
Принята к печати: 25 апреля 2018  
Доступно онлайн: 15 июня 2018

#### Ключевые слова:

Заготовительное производство  
Тонкоструйная плазменная резка  
Точность реза  
Биметаллическая композиция

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Постоянное совершенствование методов раскроя материалов обеспечивает появление новых модификаций технологических процессов заготовительного производства, в частности тонкоструйной плазменной резки. Однако производители оборудования сопровождают предлагаемые технологии рекомендациями режимов обработки, которые являются ориентировочными и предназначены для определенного круга обрабатываемых материалов. **Целью** настоящей работы является оценка технологических схем тонкоструйной плазменной резки для повышения точности реза металлических материалов, включая и биметаллические композиции. **Методы.** Оценка параметров точности и качества реза осуществлялась в соответствии со стандартом ISO 9013: 2002. В качестве материалов для исследований были выбраны сталь СтЗсп и биметаллическая композиция «сталь СтЗ + сталь 12Х18Н10Т», полученная сваркой взрывом. **Результаты и обсуждения.** Установлено, что при использовании технологии HiFocus для раскроя стали СтЗ в нижнем диапазоне толщин (3 мм) не обеспечивается регламентируемая производителем точность реза. Для повышения точности предлагается переход в рамках данной технологии на меньший типоразмер сопла. Реализация технологии HiFocus<sup>plus</sup>, отличающейся дополнительной закруткой завихряющих газов, позволяет проводить раскрой материалов в большем диапазоне толщин. Однако при толщинах раскроя 4...6 мм наблюдается превышение регламентированного отклонения реза от перпендикулярности на обеих его кромках. Для повышения точности формообразования необходимо снижение скорости раскроя. Показана эффективность использования технологии HiFocus<sup>plus</sup> для раскроя биметаллической композиции «сталь СтЗ + сталь 12Х18Н10Т». Выявлена оптимальная схема раскроя с выбором в качестве лобовой стороны стали СтЗ. Установлено, что максимальная точность реза данной композиции достигается при скорости обработки, равной 1,5 м/мин.

**Для цитирования:** Оценка технологических схем тонкоструйной плазменной резки металлических материалов и их композиций / Х.М. Рахмиев, А.А. Локтионов, А.Х. Рахмиев, Н.П. Гаар // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2018. – Т. 20, № 2. – С. 18–34. – doi: 10.17212/1994-6309-2018-20.2-18-34.

## Введение

Обеспечение эффективности производства машиностроительной продукции должно осуществляться на всех его этапах. Предпосылки в достижении результата во многом определяются техническими и технологическими решениями, принятыми еще на стадии заготовительного производства. Использование перспективных технологий и оборудования получения заготов-

ки обеспечивает снижение трудоемкости на этапах механической обработки деталей и сборки изделия. Актуальность в повышении эффективности заготовительного производства возрастает по мере увеличения масштабов выпуска продукции. В последнее время наблюдается тенденция роста количества технологий, связанных с использованием электрофизических процессов как на стадии окончательного формообразования деталей машин, так и на этапе получения заготовок. Возможность использования подобных технологий при формообразовании геометрии объектов с использованием систем ЧПУ создает хорошие предпосылки в повышении эффективности производства, особенно в условиях се-

#### \*Адрес для переписки

Рахмиев Харис Магсумович, д.т.н., профессор  
Новосибирский государственный технический университет  
пр. К. Маркса, 20,  
630073, г. Новосибирск, Россия  
Тел.: 8 (383) 346-11-88, e-mail: [kharis51@mail.ru](mailto:kharis51@mail.ru)

рийного масштаба выпуска продукции. Следует отметить, что доля серийно выпускаемых изделий в современном машиностроении превышает 60 % общего объема производства.

Все большее распространение в заготовительном производстве получают термические методы листового раскроя материалов, такие как кислородная [1–3], лазерная [4–7], плазменная резка [8–18]. Интенсивное развитие высокоэнергетических процессов в настоящее время позволило разработать новые эффективные технологические решения и создать современное оборудование для их реализации. Так, 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]. Появление новых конструкционных материалов, в том числе и биметаллических композиций, также требует поиска эффективных технологий для их обработки. В работах [21–23] показаны перспективы использования тонкоструйной плазменной резки для решения этих задач.

Существующие технологические схемы тонкоструйной плазменной резки HiFocus, HiFocus<sup>plus</sup>, HiFocusF ориентированы на достижение определенных показателей точности и качества реза различных материалов в установленном ряду толщин раскроя [24–26]. Предлагаемые заводом-изготовителем технологические рекомендации по каждой схеме ориентировочны и зачастую не соответствуют получаемым на практике результатам. Сведения по обработке новых классов материалов, в частности биметаллических композиций, в рекомендациях производителя оборудования вообще отсутствуют.

Настоящая статья посвящена анализу существующих технологических схем по обеспечению точности и качества реза на примере раскроя конструкционной стали и выработке технологических решений по повышению их эффективности при обработке металлических материалов, в том числе и их композиций.

## Методика экспериментальных исследований

Для исследования процессов формообразования в настоящей работе использовалась машина термической резки «Термит ППл» на базе установки тонкоструйной плазменной резки HiFocus 130 производства фирмы Kjellberg (Германия), состав и технические характеристики которой подробно описаны в работе [24]. Машина термической резки предназначена для раскроя листовых материалов из конструкционных нержавеющей сталей, а также сплавов на основе алюминия.

Конструкционные стали являются наиболее востребованными в промышленности, что подтверждается данными работы [27]. Кроме того, по результатам, опубликованным в работе [28], эта тенденция должна сохраниться до 2030 г. В общем объеме потребляемой стали в РФ листовой прокат согласно аналитическим данным [29] на 2011 г. занимает 56 %. В связи с этим для исследования был выбран листовой прокат из конструкционной стали обыкновенного качества Ст3сп с химическим составом и механическими свойствами, соответствующими ГОСТ 380–2005 [30].

Предельные значения толщин разрезаемого материала выбирались исходя из условия его гарантированной пробивки и раскроя согласно реализуемым технологиям. Для технологии HiFocus был выбран листовой прокат толщиной 3, 4, 5, 6, 8 мм, для технологии раскроя HiFocus<sup>plus</sup> толщины составляли 4, 6, 10, 16, 20 мм, для технологии HiFocusF – 3, 6, 10, 16, 20 мм.

Результаты тонкоструйной плазменной резки как термического метода раскроя регламентируются стандартом ISO 9013:2002, в котором точность и качество реза оцениваются угловатостью кромок реза и средней высотой профиля Rz5. Так как производитель оборудования регламентирует и величину отклонения от перпендикулярности реза, в настоящих исследованиях приведена оценка данного параметра для сопоставления результатов. Необходимость нормирования такого параметра, как ширина реза, не входящего в определение стандарта, связана с тем, что он ответствен за обеспечение точности линейных размеров при раскрое и используется как корректирующий параметр в управляющей

программе. Ширина реза регламентируется поставщиком оборудования как режимный параметр раскроя.

Исследование шероховатости поверхности реза осуществлялось при помощи профилографа-профилометра модели 252.

Определение точностных показателей и характеристик качества кромок реза проводилось при использовании в обработке комплектов новых расходных элементов плазматрона для исключения влияния их износа на точность и качество реза. Расходные элементы плазматрона были выбраны исходя из рекомендаций для используемых технологий раскроя и представлены в табл. 1.

В соответствии с технологиями раскроя и разрезаемыми толщинами были использованы рекомендуемые изготовителем в технической документации режимы обработки, представленные в табл. 2.

При проведении эксперимента применялись следующие газы: в качестве зажигающего газа – воздух, режущего газа – кислород, завихряющего газа № 1 (для технологий HiFocus и HiFocus F) – кислород; завихряющего газа № 2 – азот при давлениях и расходе, рекомендованных производителем.

Внешний вид поперечных сечений образцов после раскроя с использованием отмеченных технологий показан на рис. 1–3.

Полученные изображения использовались для количественной оценки геометрических параметров реза.

Для изучения точностных характеристик раскроя композиционных материалов в исследованиях использовалась биметаллическая композиция «сталь Ст3 + сталь 12X18H10T», полученная сваркой взрывом. Толщина пакета составляла 5 мм, при составляющих толщинах для стали Ст3 – 3 мм, для стали 12X18H10T – 2 мм.

Химический состав и механические свойства стали Ст3 регламентируются ГОСТ 380–2005 [30], стали 12X18H10T – ГОСТ 5582–75 [31].

## Результаты и их обсуждение

Результаты полученных значений угловатости кромок реза, отклонения от перпендикулярности, ширины реза и шероховатости поверхности для технологии резки HiFocus представлены на рис. 4–7 соответственно.

Следует отметить, что при тонкоструйной плазменной резке наружный контур детали фор-

Таблица 1

Table 1

**Расходные элементы плазматрона**  
**Consumables of the plasma torch**

Технология резки/ Technology	Толщина, мм/ Thickness, mm	Катод/ Cathode	Газификатор/ Gas guide	Сопло/ Nozzle	Колпачок сопла/ Nozzle cap	Колпачок завихряющего газа/ Swirl gas cap	Защитный колпачок/ Protection cap
HiFocus	3	S002	Z101	S2008x	S3004	Z4020	Z501
	4			S2007x			
	5			S2008x			
	6						
	8						
HiFocus plus	4	S002	Z102	S2008x	S3028	Z4020	Z501
	6			S2012x		Z4022	
	10					Z4025	
	16					Z4030	
	20					Z4140	
HiFocus F	3	S012	Z111	S2114	S3008	Z4030	Z501
	6						
	10						
	16						
	20						

## Режимы обработки

## Processing modes

Технология резки/Tech-nology	Толщина, мм/Thick-ness, mm	Ток, А/Current, A	Скорость резки, м/мин/Cutting speed, m/min	Время пробивки, с/Piercing delay, sec	Высота пробивки, мм/Piercing height, mm	Высота реза, мм/Torch distance, mm	Напря-жение, В/Voltage, V
HiFocus	3	50	2,2	0,1	2	2	110
	4	35	0,9	0,1	3,5	2	120
	5	45	0,8	0,2	3,5	2	132
	6	45	0,75	0,2	3,5	2	125
	8	45	0,55	0,2	4	2	130
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
HiFocus F	3	130	6	0,1	4	2	111
	6	130	3,2	0,1	4	2,5	119
	10	130	2,3	0,3	5	3	127
	16	130	1,4	0,4	5	3	132
	20	130	0,9	0,6	6	4	138

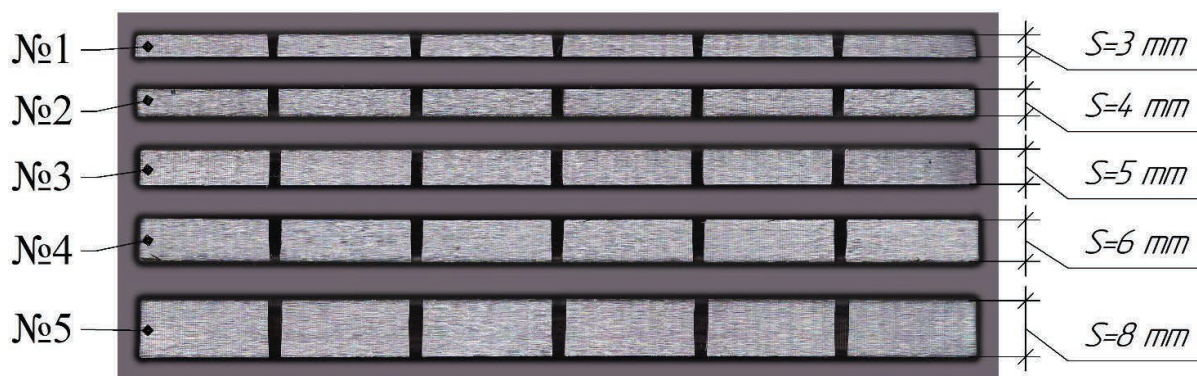


Рис. 1. Фотографическое изображение поперечного сечения образцов различной толщины после раскроя по схеме HiFocus

Fig. 1. A photographic image of a cross section of samples with different thickness after cutting by the HiFocus mode

мируется правой кромкой по направлению движения плазмодуны.

Производитель оборудования для технологии HiFocus регламентирует для всего диапазона разрезаемых толщин одно и то же значение отклонения от перпендикулярности (от  $-1^\circ$  до  $+2^\circ$ ). Как видно из результатов проведенных экспериментов (рис. 5), в области малых толщин материала (3 мм) наблюдается выход данного параметра за пределы заявленной производителем

точности практически в два раза. При этом следует обратить внимание на то, что для всех исследуемых толщин значение отклонения от перпендикулярности реза по левой кромке меньше, чем для правой.

Это объясняется тем, что плазмодуна представляет собой осесимметричный тепловой источник, и формирование правой кромки реза происходит по схеме, когда закрутка плазмобразующих газов осуществляется по часовой





Рис. 2. Фотографическое изображение поперечного сечения образцов различной толщины после раскрая по технологии HiFocus<sup>plus</sup>

Fig. 2. A photographic image of a cross section of samples with different thickness after cutting by the HiFocus mode



Рис. 3. Фотографическое изображение поперечного сечения образцов различной толщины после раскрая по технологии HiFocus F

Fig. 3. A photographic image of a cross section of samples with different thickness after cutting by the HiFocus mode

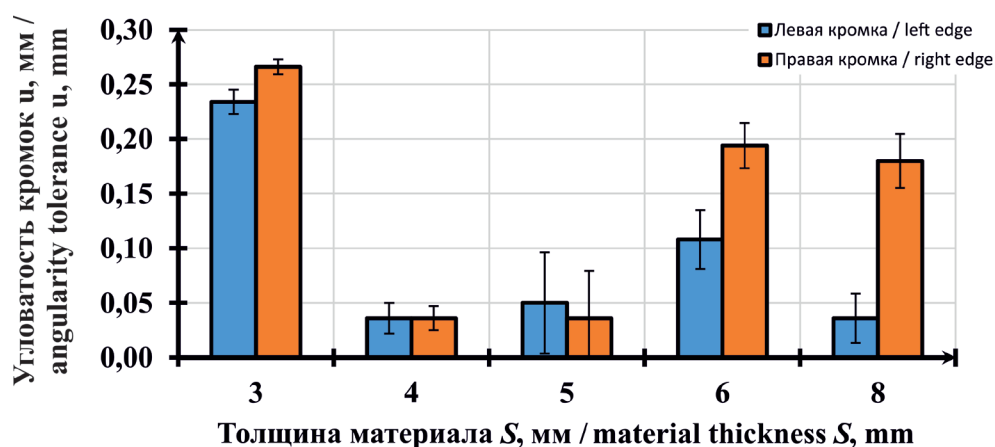


Рис. 4. Угловатость левых и правых кромок реза для различных толщин конструкционной стали при использовании технологии HiFocus

Fig. 4. Angularity of the left and right edges of the cut for different thicknesses of structural steel with using HiFocus technology

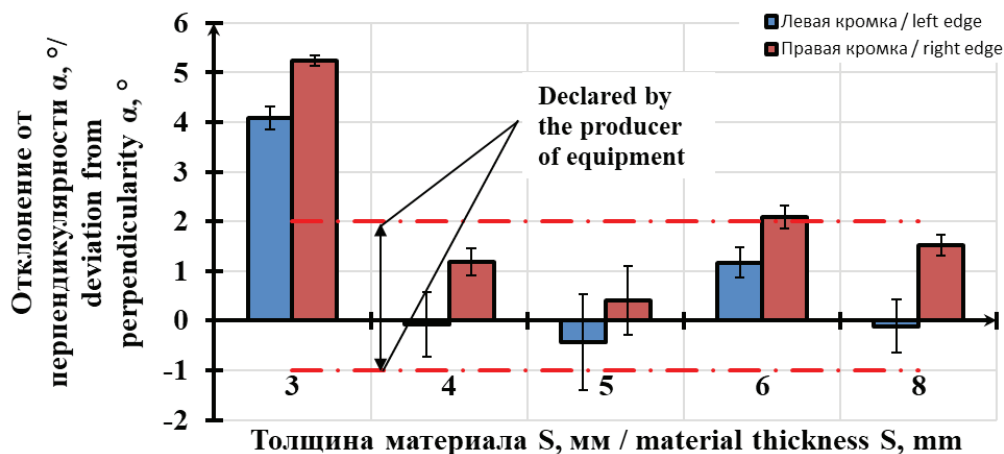


Рис. 5. Отклонение от перпендикулярности левых и правых кромок реза для различных толщин конструкционной стали при использовании технологии HiFocus

Fig. 5. Deviation of perpendicularity of the left and right edges of the cut for different thicknesses of structural steel with using HiFocus technology

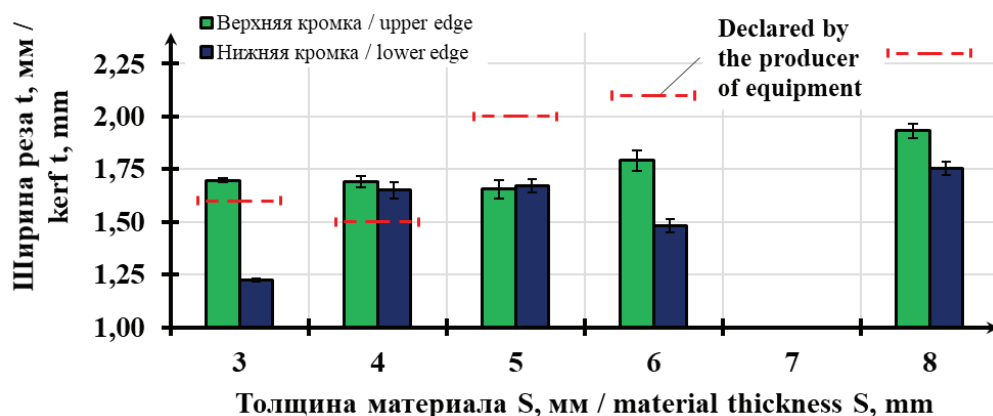


Рис. 6. Ширина реза для различных толщин конструкционной стали при использовании технологии HiFocus

Fig. 6. Cutting width for different thicknesses of structural steel with using HiFocus technology

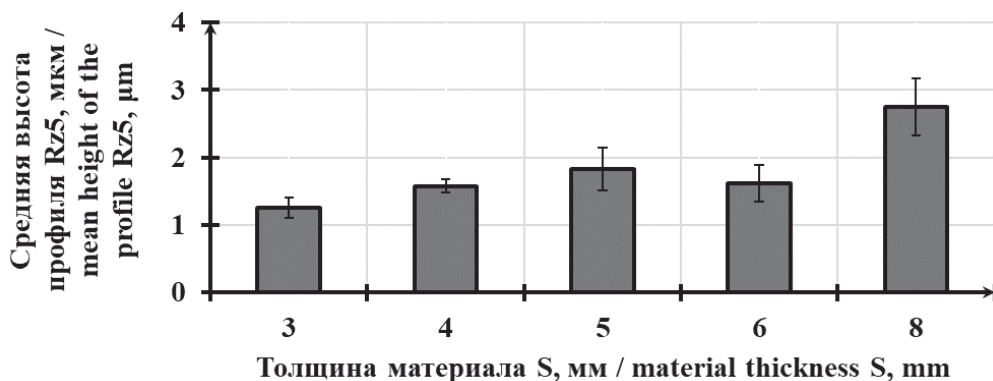


Рис. 7. Средняя высота профиля реза для различных толщин конструкционной стали при использовании технологии HiFocus

Fig. 7. Mean height of the profile of the cut surface for different thicknesses of structural steel with using HiFocus technology

стрелке и совпадает с направлением движения источника, что является аналогичным попутному фрезерованию, а формирование левой кромки реза – схеме встречного фрезерования. По этой причине в рамках данной технологии для повышения точности обработки предлагается изменить направление обхода (против часовой) для формирования наружных контуров. Кроме того, для толщины материала 3 мм возможна смена типоразмера сопла S2008x ( $d = 0,8$  мм) на меньший S2007x ( $d = 0,7$  мм) с соответствующей корректировкой режимов.

Выход значений ширины реза за регламентированное значение наблюдается при раскрое толщин 3 и 4 мм (рис. 6). Отклонение ширины реза от регламентированного значения потребует соответствующей корректировки в управляющей программе обработки для обеспечения заданных геометрических размеров заготовки.

Значение шероховатости поверхности увеличивается с ростом толщины разрезаемого материала (рис. 7). Такая зависимость объясняется увеличением энергозатрат для разделения материала с ростом толщины реза, что приводит к изменению характера стока жидкой фазы из канала реза и ухудшению микрогеометрии поверхности реза.

Результаты значений угловатости кромок реза, отклонения от перпендикулярности, ширины реза и шероховатости поверхности при раскрое по технологии HiFocus<sup>plus</sup> представлены на рис. 8–11 соответственно.

Так, отклонение от перпендикулярности при раскрое с использованием данной технологии на правой кромке реза меньше, чем на левой. Это объясняется тем, что в технологии HiFocus в конструкции колпачка завихряющего газа предусмотрена дополнительная закрутка газа, а также увеличены диаметры каналов. Такое схемное решение позволило производить раскрой больших, чем при технологии HiFocus, толщин.

Однако в диапазоне толщин 4...6 мм наблюдается превышение регламентируемого значения отклонения от перпендикулярности. Поскольку данная технология для указанных толщин не имеет возможности перехода на меньший типоразмер сопла, то можно предположить, что одним из вариантов для уменьшения отклонения от перпендикулярности может быть снижение скорости раскроя относительно рекомендованной производителем. При этом следует ожидать, что это, в свою очередь, приведет к увеличению ширины реза и потребует корректировки исходных данных в управляющей программе.

Шероховатость поверхности при этом, как и для технологии HiFocus, увеличивается с ростом толщины материала.

Результаты полученных значений угловатости кромок реза, отклонения от перпендикулярности, ширины реза и шероховатости поверхности для технологии резки HiFocusF представлены на рис. 12–15 соответственно.

Для технологии HiFocusF не регламентируется отклонение от перпендикулярности кромок

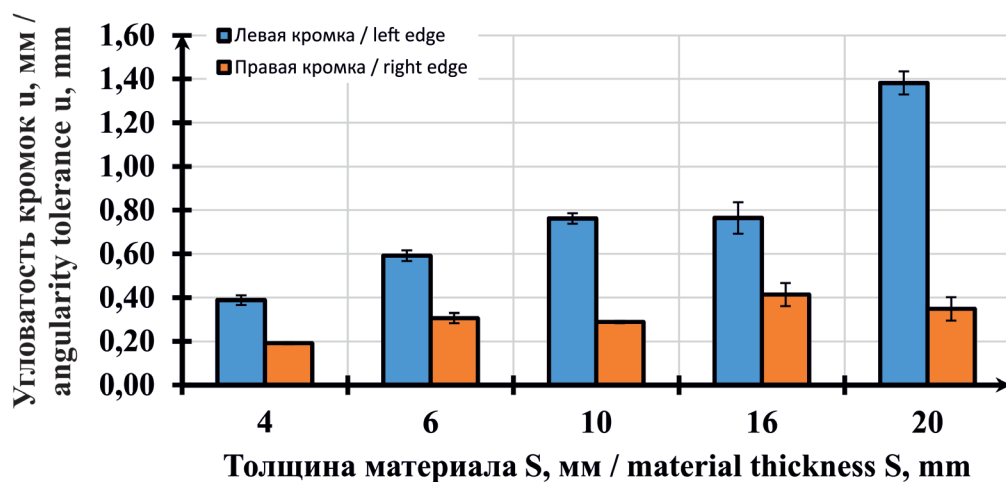


Рис. 8. Угловатость левых и правых кромок реза для различных толщин конструкционной стали при использовании технологии HiFocus<sup>plus</sup>

Fig. 8. Angularity of the left and right edges of the cut for different thicknesses of structural steel with using HiFocus<sup>plus</sup> technology

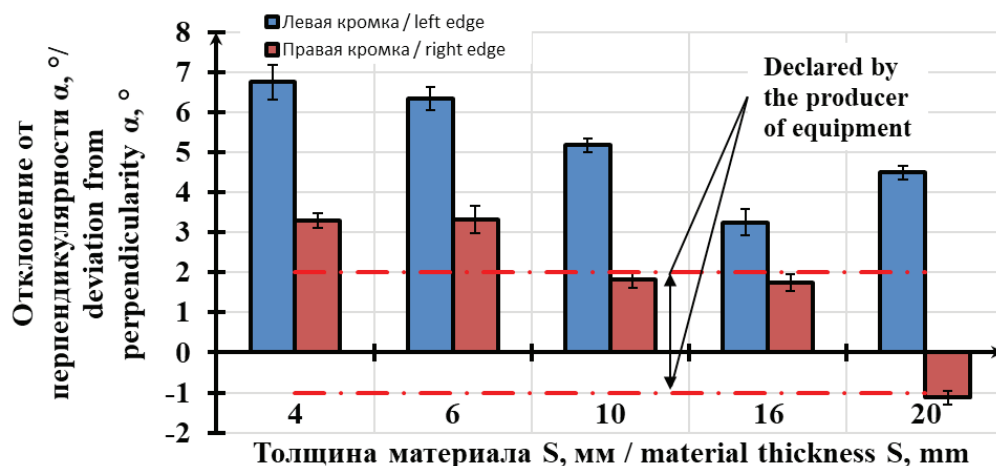


Рис. 9. Отклонение от перпендикулярности левых и правых кромок реза для различных толщин конструкционной стали при использовании технологии HiFocus<sup>plus</sup>

Fig. 9. Squareness of the left and right edges of the cut for different thicknesses of structural steel with using HiFocus<sup>plus</sup> technology

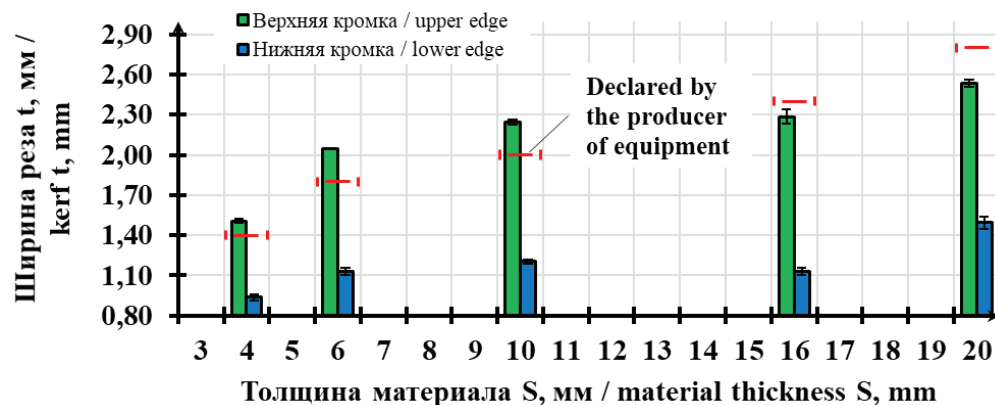


Рис. 10. Ширина реза для различных толщин конструкционной стали при использовании технологии HiFocus<sup>plus</sup>

Fig. 10. Cutting width for different thicknesses of structural steel with using HiFocus<sup>plus</sup> technology

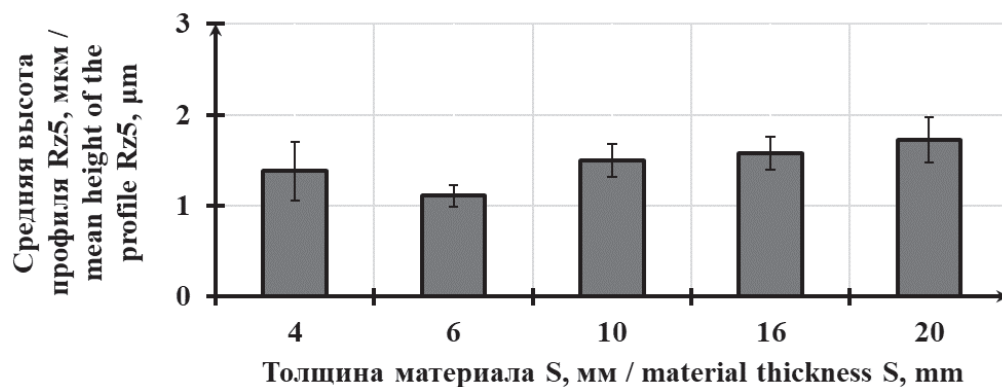


Рис. 11. Шероховатость поверхности реза для различных толщин конструкционной стали при использовании технологии HiFocus<sup>plus</sup>

Fig. 11. Roughness of the cut surface width for different thicknesses of structural steel with using HiFocus<sup>plus</sup> technology



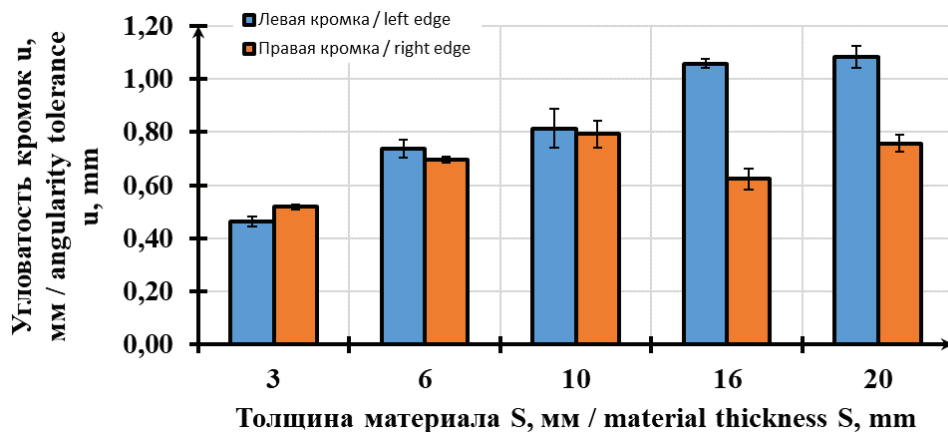


Рис. 12. Угловатость левых и правых кромок реза для различных толщин конструкционной стали при использовании технологии HiFocusF

Fig. 12. Angularity of the left and right edges of the cut for different thicknesses of structural steel with using HiFocusF technology

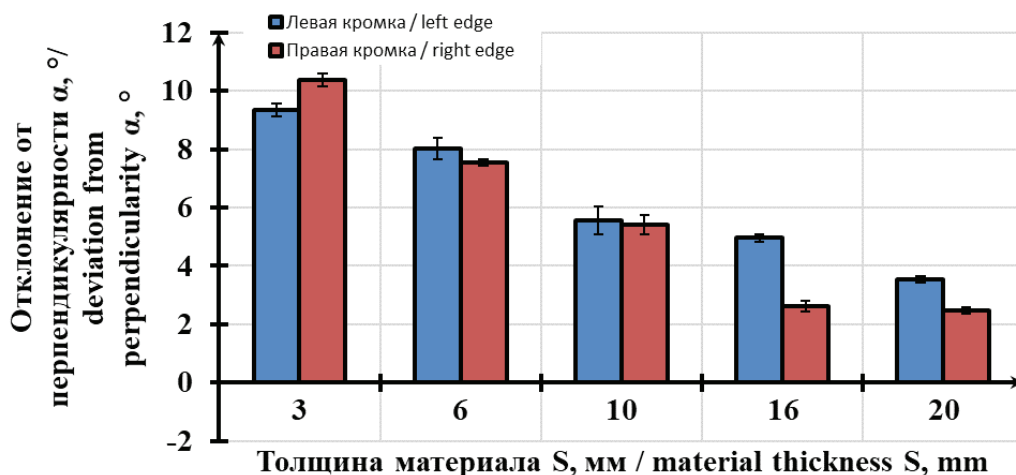


Рис. 13. Отклонение от перпендикулярности левых и правых кромок реза для различных толщин конструкционной стали при использовании технологии HiFocusF

Fig. 13. Deviation of perpendicularity of the left and right edges of the cut for different thicknesses of structural steel with using HiFocus technology

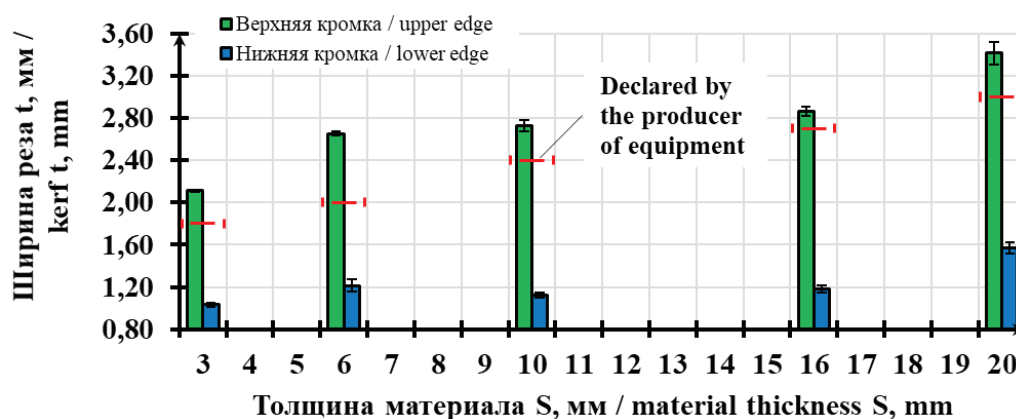


Рис. 14. Ширина реза для различных толщин конструкционной стали при использовании технологии HiFocusF

Fig. 14. Cutting width for altered thicknesses of structural steel with using HiFocusF technology

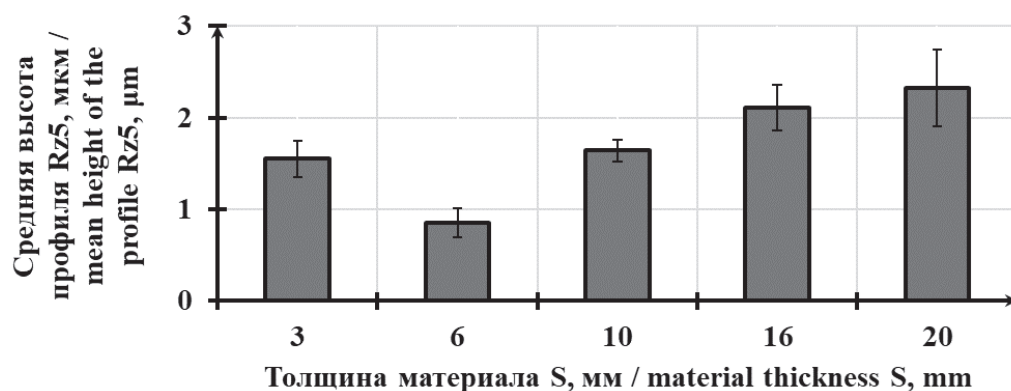


Рис. 15. Шероховатость поверхности реза для различных толщин конструкционной стали при использовании технологии HiFocusF

Fig. 15. Roughness of the cut surface width for different thicknesses of structural steel with using HiFocusF technology

реза (рис. 13), так как данная технология рассматривается как разделительная, предполагающая последующую механическую обработку заготовок, а при этом регламентируется только ширина реза (рис. 14).

При этом ширина реза во всем диапазоне исследуемых толщин превышает заявленные производителем оборудования значения (см. рис. 14).

Если для конструкционных нержавеющих сталей и алюминия технологические схемы тонкоструйной плазменной резки обеспечены рекомендациями по назначению режимов обработки, то для раскроя биметаллических композиций отсутствуют сведения как по выбору самих схем, так и по назначению режимных параметров. В работах [21–23] представлены результаты экспериментальных исследований механизма формирования канала реза в биметаллических композициях ряда металлов при использовании той или иной технологической схемы в зависимости от выбора лобовой стороны раскроя. На рис. 16–19 отражены результаты тонкоструйной плазменной резки биметаллической композиции «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т», отражающие зависимость отклонения реза от перпендикулярности от скорости реза при использовании различных технологических схем и разной лобовой стороны раскроя.

Так, при низкой скорости раскроя ( $V = 1,1$  м/мин) на участке композиции, соответствующей стали Ст3, сформирован отрицательный угол наклона реза, величина которого составляет  $-2,5^\circ$ , тогда как на участке нержавеющей стали отклонение реза от перпендикулярности характеризуется положительным углом в  $2,2^\circ$ . Среднее значение

отклонения от перпендикулярности реза по всей толщине составляет  $-1,5^\circ$ . Подобный характер реза на участке нержавеющей стали, являющейся лобовой стороной при раскрое, можно объяснить низкой величиной теплопроводности данной составляющей биметалла. При низкой скорости реза и, как следствие, относительно большом времени теплового воздействия формируется подобная геометрия реза на верхнем участке композиции. Расширение канала к нижней кромке реза на участке углеродистой стали объясняется стоком расплава нержавеющей стали из верхней зоны и разницей в коэффициентах теплопроводности составляющих биметалла. Увеличение скорости обработки снижает фактор перегрева расплава, находящегося в канале реза, его более интенсивное удаление, что приводит к формированию геометрии реза по всей длине с положительным углом наклона и обеспечивает сужение канала к нижней кромке реза. Оптимальной в рамках данной технологии и выбранной в качестве лобовой стороны раскроя стали 12Х18Н10Т является скорость обработки 1,2...1,3 м/мин, уменьшающая среднее отклонение реза от перпендикулярности до  $1^\circ$ .

Иной характер реза наблюдается при смене лобовой стороны раскроя с нержавеющей стали на низкоуглеродистую Ст3 (рис. 17).

Отклонение реза от перпендикулярности следует рассматривать на трех участках по толщине композиции. При этом среднее значение отклонения реза от перпендикулярности во всем исследованном диапазоне скоростей находится в области отрицательных углов, что свидетельствует о расширении реза к нижней его кромке.

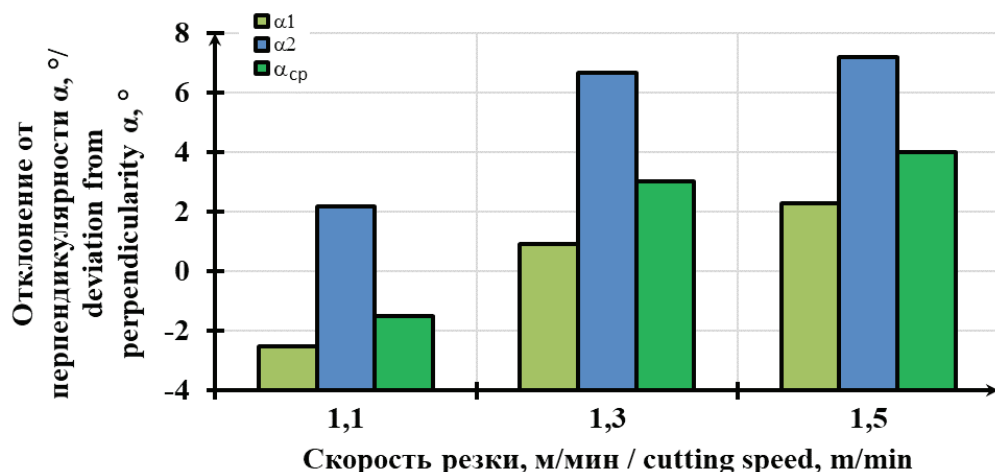


Рис. 16. Влияние скорости реза композиции «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т» на точность реза при раскрое со стороны стали 12Х18Н10Т по технологической схеме HiFocus с  $I = 45$  А для легированных сталей:

$\alpha_1$  – отклонение от перпендикулярности реза на участке «сталь Ст3»;  $\alpha_2$  – отклонение от перпендикулярности реза на участке «сталь 12Х18Н10Т»;  $\alpha_{cp}$  – среднее отклонение реза биметаллической композиции

Fig. 16. Effect of the cutting speed for the composition “steel ST3 + steel 12H18N10T” on the cutting accuracy when cutting from the side of 12H18N10T steel using the HiFocus technological mode with  $I = 45$  A for alloyed steels:

$\alpha_1$  – squareness deviation of the cut in the section “steel St3”;  $\alpha_2$  – squareness deviation of the cut in the section “steel 12H18N10T”;  $\alpha_{cp}$  – average deviation of a cut of a bimetallic composition

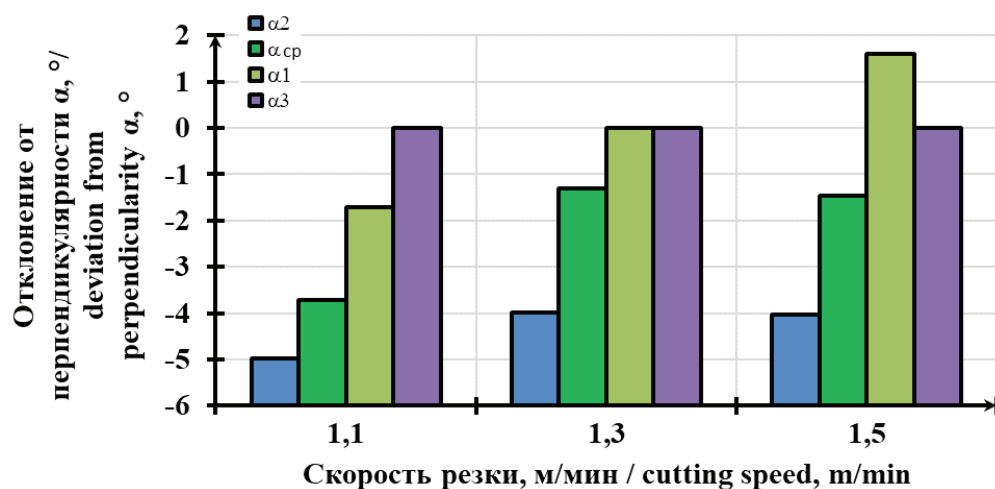


Рис. 17. Влияние скорости реза композиции «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т» на точность реза при раскрое со стороны стали Ст3 по технологической схеме HiFocus с  $I = 45$  А для легированных сталей:

$\alpha_1$  – отклонение от перпендикулярности реза на участке «сталь Ст3» (верхняя часть,  $S \sim 2$  мм);  $\alpha_2$  – отклонение от перпендикулярности реза на участке «сталь Ст3» (нижняя часть,  $S \sim 1$  мм);  $\alpha_3$  – отклонение от перпендикулярности реза на участке «сталь 12Х18Н10Т»;  $\alpha_{cp}$  – среднее отклонение реза биметаллической композиции

Fig. 17. Effect of the cutting speed for the composition “steel St3 + steel 12H18N10T” on the cutting accuracy when cutting from the side of steel St3 steel using the HiFocus technological mode with  $I = 45$  A for alloyed steels:

$\alpha_1$  – deviation of perpendicularity of the cut in the section “steel ST3” (upper part,  $S \sim 2$  mm);  $\alpha_2$  – deviation of perpendicularity of the cut in the section “steel ST3” (lower part,  $S \sim 1$  mm);  $\alpha_3$  – deviation of perpendicularity of the cut in the section “steel 12H18N10T”;  $\alpha_{cp}$  – average deviation of a cut of a bimetallic composition

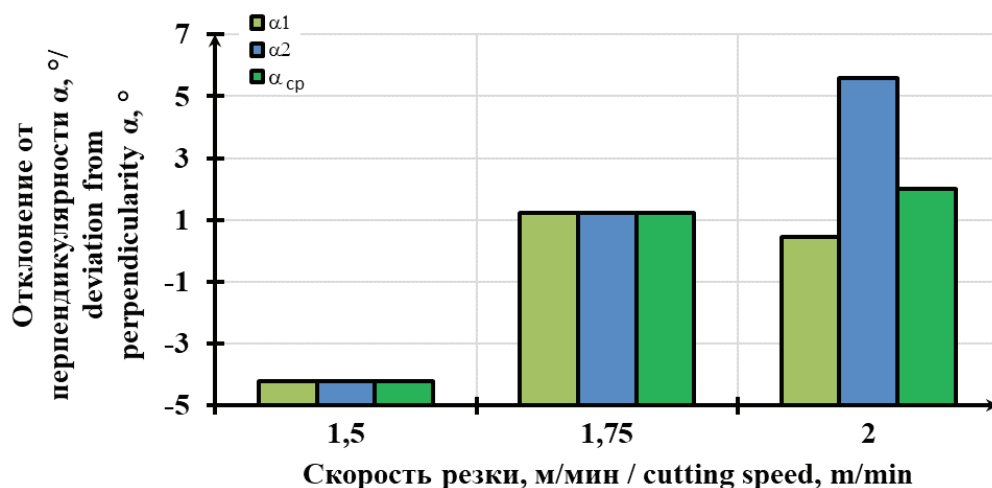


Рис. 18. Влияние скорости реза композиции «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т» на точность реза при раскрое со стороны стали 12Х18Н10Т по технологической схеме HiFocus<sup>plus</sup> с I = 50 А для углеродистых сталей:

$\alpha_1$  – отклонение от перпендикулярности реза на участке «сталь Ст3»;  $\alpha_2$  – отклонение от перпендикулярности реза на участке «сталь 12Х18Н10Т»;  $\alpha_{cp}$  – среднее отклонение реза биметаллической композиции

Fig. 18. Effect of the cutting speed for the composition “steel ST3 + steel 12H18N10T” on the cutting accuracy when cutting from the side of steel 12H18N10T steel using the HiFocus technological mode with I = 50 A for alloyed steels:

$\alpha_1$  – deviation of perpendicularity of the cut in the section “steel ST3”;  $\alpha_2$  – deviation of perpendicularity of the cut in the section “steel 12H18N10T”;  $\alpha_{cp}$  – average deviation of a cut of a bimetallic composition

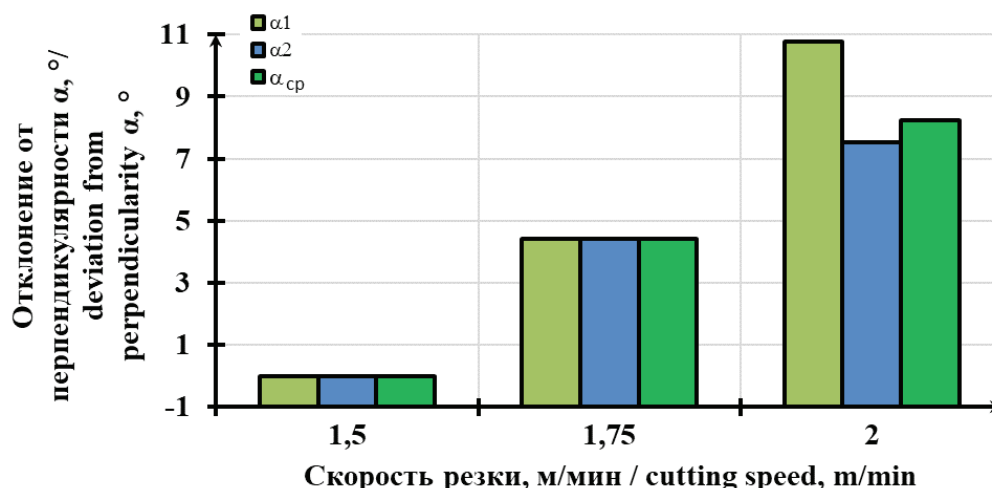


Рис. 19. Влияние скорости реза композиции «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т» на точность реза при раскрое со стороны стали Ст3 по технологической схеме HiFocus<sup>plus</sup> с I = 50 А для углеродистых сталей:

$\alpha_1$  – отклонение реза от перпендикулярности на участке «сталь Ст3»;  $\alpha_2$  – отклонение реза от перпендикулярности на участке «сталь 12Х18Н10Т»;  $\alpha_{cp}$  – среднее отклонение реза биметаллической композиции

Fig. 19. Effect of the cutting speed for the composition “steel ST3 + steel 12H18N10T” on the cutting accuracy when cutting from the side of steel ST3 steel using the HiFocus technological mode with I = 50 A for carbon steels:

$\alpha_1$  – deviation of perpendicularity of the cut in the section “steel ST3”;  $\alpha_2$  – deviation of perpendicularity of the cut in the section “steel 12H18N10T”;  $\alpha_{cp}$  – average deviation of a cut of a bimetallic composition



Использование технологии HiFocus<sup>plus</sup> на режимах реза углеродистых сталей для раскроя биметаллической композиции показало различный характер формирования точности реза при разной лобовой стороне раскроя. Так, при обработке биметаллической композиции со стороны стали 12X18H10T (рис. 18) в диапазоне малых скоростей раскроя формируется рез с расширением канала к нижней кромке с отрицательным углом наклона ( $-4^\circ$ ).

Это можно объяснить значительным перегревом расплава в канале реза вследствие малых скоростей раскроя. Увеличение скорости до 1,75 м/мин снижает количество жидкой фазы в канале и более интенсивное ее удаление из зоны реза, что обеспечивает повышение точности обработки. Дальнейшее увеличение скорости приводит к ухудшению точностных показателей.

Смена лобовой стороны раскроя композиции на сталь Ст3 (рис. 19) обеспечивает максимальную точность реза в области малых скоростей обработки. Увеличение скорости раскроя снижает точностные показатели реза.

Такой результат можно объяснить тем, что при повышении скорости обработки происходит смещение анодного пятна по каналу реза в верхнюю его часть [8], приводящее к интенсификации нагрева на участке стали Ст3 и ослаблению в зоне стали 12X18H10T.

## Выводы

1. Установлено, что при использовании технологий тонкоструйной плазменной резки HiFocus и HiFocus<sup>plus</sup> для резки конструкционных сталей в нижнем диапазоне толщин не обеспечиваются заявленные производителем показатели точности реза. Для повышения точности раскроя конструкционных сталей толщиной 3 мм с использованием технологии HiFocus рекомендуется переход на меньший типоразмер сопла с соответствующей корректировкой режимных параметров. Обеспечение точности раскроя конструкционных сталей толщиной 4...6 мм с использованием технологии HiFocus<sup>plus</sup> возможно при снижении скорости реза относительно рекомендованного значения для данной технологии. Соответствующее изменению скоростного режима увеличение ширины реза потребует корректировки параметров в управляющей программе для обеспечения точности размеров

заготовки. Реализация технологии HiFocusF возможна в рекомендованном диапазоне режимных параметров, так как данная технология рассматривается как разделительная и предполагает последующую механическую обработку заготовок.

2. Показана эффективность использования технологии HiFocus<sup>plus</sup> для раскроя биметаллической композиции «сталь Ст3 + сталь 12X18H10T». Оптимальной для обеспечения точности реза является схема раскроя биметаллической композиции со стороны стали Ст3 при скорости обработки 1,5 м/мин.

## Список литературы

1. Полевой Г.В., Сухинин Г.К. Газопламенная обработка металлов. – М.: Академия, 2005. – 336 с. – ISBN 5-7695-1604-6.
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. – ISBN 5-217-01455-5.
4. Григорьянц А.Г., Соколов А.А. Лазерная резка металлов. – М.: Высшая школа, 1988. – 127 с. – ISBN 5-06-001252-2.
5. Laser beam welding of high stressed, complex aircraft structural parts / P. Mueller-Hummel, S. Ferstl, M. Sengotta, R. Lang // Proceedings of SPIE. – 2003. – Vol. 4831: First International Symposium on High-Power Laser Macroprocessing. – doi: 10.1117/12.497719.
6. Steen W.M. Laser material processing. – 3rd ed. – London: Springer-Verlag 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. – ISBN 5-7038-2701-9.
8. Ширинов И.Г., Котиков В.Н. Плазменная резка. – Л.: Машиностроение, 1987. – 192 с.
9. Duley W. Laser processing and analysis of materials. – New York: Springer US, 1983. – 504 p. – doi: 10.1007/978-1-4757-0193-7.
10. Handbuch zum Thema Plasmaschneiden [Elektronische ressource] / Werkstatt Ausrüstung Leitner joint. – Grödig, 2002. – 66 s. – URL: [https://www.wal-austria.at/cu/wal/pdf/Handbuch\\_Plasmaschneiden\\_web.pdf](https://www.wal-austria.at/cu/wal/pdf/Handbuch_Plasmaschneiden_web.pdf) (accessed: 11.05.2018).
11. Bererziuk M., Lezoh J. Air plasma cutting with ABIPLAS CUT holders manufactured by ABICOR BINZEL // Welding International. – 2008. – Vol. 22, N 6. – P. 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, N 11. – P. 904–908. – doi: 10.1080/09507119409548719.



13. *Salonitis K., Vatosianos S.* Experimental investigation of the plasma arc cutting process // *Procedia CIRP*. – 2012. – Vol. 3. – P. 287–292. – doi: 10.1016/j.procir.2012.07.050.

14. *Celik Y.H.* Investigating the effects of cutting parameters on materials cut in CNC plasma // *Materials and Manufacturing Processes*. – 2013. – Vol. 28, N 10. – P. 1053–1060. – doi: 10.1080/10426914.2013.773015.

15. Optimization of process parameters in plasma arc cutting of EN 31 steel based on MRR and multiple roughness characteristics using grey relational analysis / *M.K. Das, K. Kumar, T.Kr. Barman, P. Sahoo* // *Procedia Materials Science*. – 2014. – Vol. 5. – P. 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, N 11. – P. 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, N 4. – P. 441–458. – doi: 10.3846/1392-6292.2007.12.441-458.

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

19. *Kirkpatrick I.* High definition plasma – an alternative to laser technology // *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*. – 1998. – Vol. 70, N 3. – P. 215–217.

20. *Чуев 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. *Rakhmyanov Kh., Rakhmyanov A., Heifetz M.* High-precision plasma cutting of the steel – aluminum bimetallic composition // *Applied Mechanics and Materials*. – 2015. – Vol. 788. – P. 41–45. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.788.41.

22. *Rakhmyanov Kh., Rakhmyanov A., Zhuravlev A.* Advantages of high-precision plasma cutting for processing bimetallic compositions // *Applied Mechanics and Materials*. – 2015. – Vol. 698. – P. 294–298. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.698.294.

23. *Рахмиянов Х.М., Рахмиянов А.Х., Смирнов А.Н.* Особенности формирования канала реза при тонкоструйной плазменной резке биметаллических композиций, выполненных из разнородных материалов // *Обработка металлов (технология, оборудова-*

*ние, инструменты)*. – 2016. – № 1 (70). – С. 22–30. – doi: 10.17212/1994-6309-2016-1-22-30.

24. Estimation of accuracy in forming construction steels by the hifocus technology of high-precision plasma cutting / *Kh.M. Rakhmyanov, N.P. Gaar, A.Kh. Rakhmyanov, A.A. Loktionov* // 2016 11th International forum on strategic technology, June 1–3, 2016, Novosibirsk, Russia: proceedings of IFOST-2016. – Novosibirsk, 2016. – Pt. 1. – P. 66–68. – doi: 10.1109/IFOST.2016.7884190.

25. *Loktionov A., Gaar N.* 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: Actual Problems and Decisions in Machine Building. – P. 46–51. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.788.46.

26. *Рахмиянов Х.М., Гаар Н.П., Локтионов А.А.* Технологические возможности схемы HiFocus тонкоструйной плазменной резки в обработке конструкционных сталей // Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации): материалы докладов 7 Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Иркутск, 26–28 апреля 2017 г. – Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2017. – С. 38–43.

27. Развитие российской металлургии в 2014 году по состоянию на 27.02.2015 г.: отраслевой отчет [Электронный ресурс] / Аналитический центр «Национальное Рейтинговое Агентство». – 2015. – URL: [http://www.ancentre.ru/sites/default/files/analytics\\_files/metallurg\\_2014.pdf](http://www.ancentre.ru/sites/default/files/analytics_files/metallurg_2014.pdf) (дата обращения: 11.05.2018).

28. Об утверждении Стратегии развития черной металлургии России на 2014–2020 годы и на перспективу до 2030 года и Стратегии развития цветной металлургии России на 2014–2020 годы и на перспективу до 2030 года: Приказ Минпромторга России от 05.05.2014 № 839 [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс. – 2014. – URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_165502/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_165502/) (дата обращения: 11.05.2018).

29. *Марпанус С.А.* Перспектива обнадеживает // *Уральский рынок металлов*. – 2012. – № 2 (167). – С. 28–31.

30. ГОСТ 380–2005. Сталь углеродистая обыкновенного качества. Марки. – М.: Стандартинформ, 2007. – 8 с.

31. ГОСТ 5582–75 Прокат тонколистовой коррозионно-стойкий, жаростойкий и жаропрочный. Технические условия. – М: Стандартинформ, 2003. – 11 с.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



## Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



### Evaluation of Technological Schemes of High Precision Plasma Cutting of Metallic Materials and its Compositions

*Kharis Rakhimyanov<sup>a,\*</sup>, Alexander Loktionov<sup>b</sup>, Andrey Rakhimyanov<sup>c</sup>, Nadezhda Gaar<sup>d</sup>*

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

<sup>a</sup> <http://orcid.org/0000-0003-2781-0225>, [kharis51@mail.ru](mailto:kharis51@mail.ru), <sup>b</sup> <http://orcid.org/0000-0003-1168-6688>, [pushkin-lok@mail.ru](mailto:pushkin-lok@mail.ru),  
<sup>c</sup> <http://orcid.org/0000-0003-3805-0874>, [centerfht@mail.ru](mailto:centerfht@mail.ru), <sup>d</sup> <http://orcid.org/0000-0001-8517-658X>, [lianelas@mail.ru](mailto:lianelas@mail.ru)

#### ARTICLE INFO

##### Article history:

Received: 14 March 2018

Revised: 30 March 2018

Accepted: 25 April 2018

Available online: 15 June 2018

##### Keywords:

Blank production

High-precision plasma cutting

Cutting accuracy

Bimetallic composition

#### ABSTRACT

**Introduction.** Continuous improvement of materials cutting methods provides the appearance of new modifications of technological processes of blanking production, in particular, high precision plasma cutting. However, the equipment manufacturers accompany the proposed technologies with recommendations of processing modes, which are indicative and intended for a certain range of processed materials. **The purpose** of the paper is to improve the technological schemes of high precision plasma cutting in terms of quantity evaluation of cutting accuracy and surface quality of cut for structural steels, including bimetallic compositions in a specified thickness range. **Methods.** The evaluation of the accuracy and quality of the cut is carried out in accordance with ISO 9013: 2002. The steel ST3SP and the bimetallic composition “steel ST3 + steel 12H18N10T”, formed by explosion welding are chosen as the study material. **Results and discussion.** It is established that when HiFocus technology is used for cutting the steel ST3 in the lower thickness range (3 mm), the precision of the cut is not ensured. To increase the accuracy of the cutting the transition to a smaller nozzle size is proposed in this technology. The application of HiFocus<sup>plus</sup> technology, which is distinguished by the additional swirling of swirling gases, makes it possible to cut materials in a wider range of thicknesses. However, at cutting thicknesses of 4...6 mm, there is an excess of the acceptable deviation of the cut perpendicularity at both its edges. To increase the accuracy of shaping, a reduction in cutting speed is necessary. The efficiency of using Hi Focus<sup>plus</sup> technology for cutting a bimetallic composition “steel ST3 + STEEL 12H18N10T” is shown. The optimal cutting scheme is identified with the choice of ST3 steel as the front side. It is established that the maximum cutting accuracy for this composition is achieved at a cutting speed of 1.5 m/min.

**For citation:** Rakhimyanov Kh.M., Loktionov A.A., Rakhimyanov A.Kh., Gaar N.P. Evaluation of technological schemes of high precision plasma cutting of metallic materials and its compositions. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2018, vol. 20, no. 2, pp. 18–34. doi: 10.17212/1994-6309-2018-20.2-18-34. (In Russian).

#### References

1. Polevoi G.V., Sukhinin G.K. *Gazoplamennaya obrabotka metallov* [Gas flame processing of metals]. Moscow, Akademiya Publ., 2005. 336 p. ISBN 5-7695-1604-6.
2. Sukhinin G.K. *Rezka metallov bol'shoi tolshchiny* [Cutting of metals of large thickness]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1983. 39 p.
3. Polevoi G.V., Sukhinin G.K. *Plamennaya i gazotermicheskaya obrabotka materialov* [Flame and gas-thermal processing of materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1993. 335 p. ISBN 5-217-01455-5.
4. Grigor'yants A.G., Sokolov A.A. *Lazernaya rezka metallov* [Laser cutting of metals]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1988. 127 p.

#### \* Corresponding author

Rakhimyanov Kharis M., D. Sc (Engineering), Professor  
 Novosibirsk State Technical University,  
 20 Prospect K. Marksa,  
 630073, Novosibirsk, Russian Federation  
**TEL.:** 8 (383) 346-11-88, **e-mail:** [kharis51@mail.ru](mailto:kharis51@mail.ru)





5. Mueller-Hummel P., Ferstl S., Sengotta M., Lang R. Laser beam welding of high stressed, complex aircraft structural parts. *Proceedings of SPIE*, 2003, vol. 4831: First International Symposium on High-Power Laser Macroprocessing. doi: 10.1117/12.497719.
6. Steen W.M. *Laser material processing*. 3rd ed. London, Springer-Verlag 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 lazernoi obrabotki* [Technological processes of laser processing]. 2nd ed. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2008. 664 p. ISBN 5-7038-2701-9.
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*. New York, Springer US, 1983. 504 p. doi: 10.1007/978-1-4757-0193-7.
10. *Handbuch zum Thema Plasmaschneiden*. Werkstatt Ausrüstung Leitner joset. Grödig, 2002. 66 p. Available at: [https://www.wal-austria.at/cu/wal/pdf/Handbuch\\_Plasmaschneiden\\_web.pdf](https://www.wal-austria.at/cu/wal/pdf/Handbuch_Plasmaschneiden_web.pdf) (accessed 11.05.2018).
11. Bererziuk M., Lezoh J. Air plasma cutting with ABIPLAS CUT holders manufactured by ABICOR BINZEL. *Welding International*, 2008, vol. 22, no. 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, no. 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. Celik Y.H. Investigating the effects of cutting parameters on materials cut in CNC plasma. *Materials and Manufacturing Processes*, 2013, vol. 28, no. 10, pp. 1053–1060. doi: 10.1080/10426914.2013.773015.
15. Das M.K., Kumar K., Barman T.Kr., Sahoo P. 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, no. 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, no. 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 I. High definition plasma – an alternative to laser technology. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 1998, vol. 70, no. 3, pp. 215–217.
20. Chieu Kuang Fi. *Issledovanie effektivnosti tekhnologii uzkostruinoi plazmennoi rezki metallov*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Research on efficiency of high precision plasma cutting of metals technology. Author's abstract of PhD eng. sci. diss.]. St. Petersburg, 2008. 26 p.
21. Rakhmyanov Kh., Rakhmyanov A., Heifetz M. High-precision plasma cutting of the steel – aluminum bimetallic composition. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 788, pp. 41–45. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.788.41.
22. Rakhmyanov Kh., Rakhmyanov A., Zhuravlev A. Advantages of high-precision plasma cutting for processing bimetallic compositions. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 698, pp. 294–298. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.698.294.
23. Rakhmyanov Kh.M., Rakhmyanov A.Kh., Smirnov A.N. Osobennosti formirovaniya kanala reza pri tonkostruinoi plazmennoi rezke bimetallicheskih kompozitsii, vypolnennykh iz raznorodnykh materialov [Features of cut channel formation during high-precision plasma cutting of bimetallic compositions made of promiscuous materials]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2016, no. 1 (70), pp. 22–30. doi: 10.17212/1994-6309-2016-1-22-30.
24. Rakhmyanov Kh.M., Gaar N.P., Rakhmyanov A.Kh., Loktionov A.A. Estimation of accuracy in forming construction steels by the hifocus technology of high-precision plasma cutting. *2016 11th International forum on strategic technology*, June 1–3, 2016, Novosibirsk, Russia: proceedings of IFOST-2016, pt. 1, pp. 66–68. doi: 10.1109/IFOST.2016.7884190.
25. Loktionov A., Gaar N. 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: Actual Problems and Decisions in Machine Building, pp. 46–51. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.788.46.



26. Rakhimyanov Kh.M., Gaar N.P., Loktionov A.A. [Technological possibilities of the HiFocus scheme of high precision plasma cutting at the processing of structural steels]. *Zhiznennyi tsikl konstruktivnykh materialov (ot polucheniya do utilizatsii): materialy dokladov 7 Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Proceedings of the VII Russian Scientific and Technical Conference with International Participation “The life cycle of construction materials (from receipt to disposal)”], Irkutsk, 2017, pp. 38–43. (In Russian).

27. *Razvitie rossiiskoi metallurgii v 2014 godu po sostyaniyu na 27.02.2015 g.: otraslevoi otchet* [The development of Russian metallurgy in 2014 by state on February 27, 2015. Industry report]. Available at: [http://www.ancentre.ru/sites/default/files/analytics\\_files/metallurg\\_2014.pdf](http://www.ancentre.ru/sites/default/files/analytics_files/metallurg_2014.pdf) (accessed 11.05.2018).

28. *Ob utverzhdenii Strategii razvitiya chernoi metallurgii Rossii na 2014–2020 gody i na perspektivu do 2030 goda i Strategii razvitiya tsvetnoi metallurgii Rossii na 2014–2020 gody i na perspektivu do 2030 goda*: Prikaz Minpromtorga Rossii ot 05.05.2014 № 839 [On the approval of the Strategy for the development of the Russian ferrous metallurgy for 2014–2020 and for the future up to 2030 and the Strategy for the development of non-ferrous metallurgy in Russia for 2014–2020 and for the future up to 2030: The Ministry of Industry and Trade of Russia decree No. 839 of 05/05/2014]. Available at: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_165502](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_165502) (accessed 11.05.2018).

29. Martanus S.A. Perspektiva obnadezhivaet [Prospects are encouraging]. *Ural'skii rynek metallov = The Ural Metal Market Magazine*, 2012, no. 2 (167), pp. 28–31.

30. GOST 380–2005. *Stal' uglirodistaya obyknovennogo kachestva. Marki* [State Standard 380–2005. Common quality carbon steel. Grades]. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 8 p.

31. GOST 5582–75. *Prokat tonkolistovoi korrozionno-stoikii, zharostoikii i zharoprochnyi. Tekhnicheskie usloviya* [State Standard 5582–75. Stainless and heat-resisting sheet. Specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 2003. 11 p.

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2018 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).