

ИННОВАЦИИ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ
ПРОМЫШЛЕННОМ И ЛАБОРАТОРНОМ
ОБОРУДОВАНИИ, ТЕХНОЛОГИЯХ И МАТЕРИАЛАХINNOVATION IN METALLURGICAL INDUSTRIAL
AND LABORATORY EQUIPMENT, TECHNOLOGIES
AND MATERIALS

Оригинальная статья

УДК 621.791.947.55

DOI 10.17073/0368-0797-2022-1-38-47



РАЗРАБОТКА ОБОРУДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ПРЕЦИЗИОННОЙ ВОЗДУШНО-ПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКИ ТОЛСТОЛИСТОВОЙ СТАЛИ

С. В. Анахов¹, Б. Н. Гузанов¹, А. В. Матушкин²

¹ Российский государственный профессионально-педагогический университет (Россия, 620012, Екатеринбург, ул. Машиностроителей, 11)

² Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (Россия, 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

Аннотация. Исследована структура разделочных швов, полученных после резки стали 09Г2С новым узкоструйным плазматроном типа ПМВР-5.3, имеющим ряд конструктивных особенностей в системе газодинамической стабилизации (ГДС) плазменной дуги. Для повышения эффективности ГДС в плазматроне ПМВР-5.3 использован симметричный вход плазмообразующего газа в систему деления потока и газодинамический стабилизатор потока, использующий два (формирующий и стабилизирующий) завихрителя с переменным числом каналов завихрения. Показано, что достигнутое преимущество в эффективности ГДС позволяет получить высокое качество реза на сталях типа 09Г2С толщиной 40 мм с высокой производительностью и меньшими энергетическими затратами. Аналитическими методами доказана высокая степень прецизионности резки новым плазматроном: малая ширина реза, отсутствие оплавления и скругления верхней кромки, а также граты в нижней части реза и брызг в верхней части реза, практически нулевое угловое отклонение, минимальные величины микрорельефа поверхности и ширины зоны термического влияния. Металлографический анализ и определение твердости показали наличие трех субзон в образовавшейся зоне термического влияния со значительными структурными изменениями в двух из них. Отмечен ряд факторов, влияющих на выявленные изменения в структурообразовании, а также на установленные при микрорентгено-спектральном анализе изменения в элементном составе поверхностного слоя разделочного шва. Обращено внимание на микрорельеф поверхности после плазменной резки, который по всем показателям качества соизмерим с механической обработкой поверхности после фрезерования и соответствует второму классу качества по чистоте поверхности. Доказано, что применение нового узкоструйного плазматрона позволяет произвести качественный раскрой листовой стали в диапазоне толщин вплоть до 40 мм и более. Однако сварку заготовок без предварительной механической обработки можно производить при толщине реза не более 20 мм.

Ключевые слова: плазматрон, проектирование, зона термического влияния, структурные превращения, дефекты, качество, эффективность

Для цитирования: Анахов С.В., Гузанов Б.Н., Матушкин А.В. Разработка оборудования и технологии прецизионной воздушно-плазменной резки толстолистовой стали // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 1. С. 38–47.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-1-38-47>

Original article

DEVELOPMENT OF EQUIPMENT AND TECHNOLOGY FOR PRECISION AIR-PLASMA CUTTING OF PLATE STEEL

S. V. Anakhov¹, B. N. Guzanov¹, A. V. Matushkin²

¹ Russian State Professional Pedagogical University (11 Mashinostroitelei Str., Yekaterinburg 620012, Russian Federation)

² Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (19 Mira Str., Yekaterinburg 620002, Russian Federation)

Abstract. The authors have investigated the structure of cutting seams obtained after cutting steel 09G2S with a new narrow-jet plasma torch of PMVR-5.3 type which has a number of design features in gas dynamic stabilization system (GDS) of plasma arc. To increase the efficiency of GDS in PMVR-5.3 plasma torch, a symmetrical input of plasma-forming gas (PFG) into the flow division system and a gas-dynamic flow stabilizer using two (forming and stabilizing) swirlers with a variable number of swirl channels were used. It is shown that the achieved advantage in GDS efficiency makes it possible to obtain high cutting quality of steel 09G2S with thickness of 40 mm with high productivity and lower energy costs. Analytical methods have proved a high degree of cutting precision of the new torch – a small cut width, no melting and rounding of the upper edge, as well as a grate in the cut lower part and splashes in the cut upper part, almost zero angular deviation, minimum values of the surface microrelief and width of the thermal impact zone. Metallographic analysis and determination of hardness showed the presence of three subzones in the thermal impact zone

with significant structural changes in two of them. A number of factors were noted influencing the revealed changes in the structure formation, as well as changes in the elemental composition of the cutting seam surface layer revealed during the X-ray spectral analysis. Attention is drawn to the surface microrelief after plasma cutting, which in all quality indicators is commensurate with machining of the surface after milling and corresponds to the second class of quality in terms of surface cleanliness. It was proved that the use of the new narrow-jet plasma torch allows high-quality cutting of plate steel in thickness range up to 40 mm or more. However, welding of blanks without pre-machining can be carried out with a cutting thickness of no more than 20 mm.

Keywords: plasma torch, design, thermal impact zone, structure transformation, defects, quality, efficiency

For citation: Anakhov S.V., Guzanov B.N., Matushkin A.V. Development of equipment and technology for precision air-plasma cutting of plate steel. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 1, pp. 38–47. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-1-38-47>

ВВЕДЕНИЕ

Развитие современного заготовительного производства при изготовлении ответственных сварных металлоконструкций и ряда других изделий машиностроения в первую очередь направлено на совершенствование технологий первичной обработки металлопроката. От их правильного выбора во многом зависит последующее количество необходимых операций и, как следствие, конечная себестоимость выпускаемой продукции. Одной из наиболее значимых технологий, к которой предъявляют все более жесткие требования, считается резка листовой стали различного профиля с обеспечением высокой точности и качества раскроя, что чаще всего сложно достичь с использованием классических методов обработки.

Наиболее перспективными в этих целях в настоящее время считаются воздушно-плазменные способы резки [1 – 3]. Плазменную резку, по мнению ряда авторов, можно считать безальтернативной технологией в заготовительном и сварочном производствах для разделки различных металлических материалов средних и больших толщин в интервале 10 – 50 мм [4 – 6]. По сравнению с механическим, лазерным, гидроабразивным и газовым способами разделки металлов плазменная резка обеспечивает в данном диапазоне толщин требуемое качество при высокой производительности и весьма низкой удельной себестоимости процесса [7 – 9]. В тоже время необходимо учитывать, что достижение конкурентных преимуществ плазменной резки возможно лишь при использовании высокоэффективных современных плазматронов, являющихся основным

элементом данного технологического процесса. Однако анализ рынка отечественной плазматронной техники показывает, что по большинству технологически важных параметров продукция российских разработчиков уступает параметрам, достигаемым при использовании плазматронов лучших зарубежных производителей (Hypertherm, Kjellberg, MesserGreisheim и ряда других) [10 – 12]. В этой связи особое внимание уделяется разработке и внедрению отечественных импортозаменяющих плазменных технологий и соответствующего оборудования, чьи конкурентные преимущества должны быть обоснованы как в процессе проектирования, так и в ходе экспериментального исследования их эффективности и качества.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Совершенствование плазменных технологий в области резки металлических материалов привело к созданию новой модификации плазменного раскроя с использованием узкоструйной плазменной резки, что позволило рассматривать ее как альтернативу лазерной резке по таким параметрам, как точность и качество реза [13 – 15]. В русле подобных исследований и с учетом накопленного собственного опыта авторским коллективом на базе ООО НПО «Полигон» разработан и изготовлен узкоструйный плазматрон пятого поколения ПМВР-5.3 с новой системой газовыхревой стабилизации плазменной дуги (рис. 1).

Данный плазматрон предназначен для прецизионной механизированной и ручной плазменной резки металла и имеет ряд конструктивных особенностей,



Рис. 1. Плазматрон ПМВР-5.3 для прецизионной воздушно-плазменной резки металлов

Fig. 1. PMVR-5.3 plasma torch for precision air-plasma metal cutting

существенно влияющих на эффективность и качество технологии. Подавляющая часть металлорежущих плазматронов использует газодинамическую систему стабилизации (ГДС), необходимую для формирования плазменной дуги и защиты сопла плазматрона от ее теплового воздействия, предотвращения эффектов шунтирования на корпус сопла и преждевременного износа катода. Как правило, в этих целях используется завихритель, устанавливаемый на входе в сопловой узел переменного проходного сечения, выполняющего также функцию газодинамического обжатия плазменной струи [16]. Однако, как показали авторские исследования, большинство подобных газовихревых систем (ГВС) не обеспечивают достижения как необходимых максимальных значений, так и равномерности распределения газодинамических и термокинетических параметров газо-плазменного потока (скоростей, температур, удельных расходов и энергий) как в сопловом узле плазматрона, так и в зоне воздействия потока на поверхность металла [17].

По этой причине качество воздушно-плазменной резки зачастую проигрывает лазерной при резке сталей малых (до 10 мм) толщин и имеет ограничения по эффективности в сравнении с газовой резкой при разделке толстолистовых металлов. В целях повышения эффективности ГВС в плазматроне ПМВР-5.3 использован симметричный вход плазмообразующего газа (ПОГ) в систему деления потока с последующей подачей ПОГ в газодинамический стабилизатор потока, состоящий из трех последовательно расположенных элементов газовоздушного тракта (ГВТ): газоподводящего, газоформирующего и газовихревого участков, использующих два (формирующий и стабилизирующий) завихрителя с переменным числом каналов завихрения (рис. 2).

Конструкция ГВТ плазматрона ПМВР-5.3 оптимизирована с применением методов численного анализа по газодинамическим критериям эффективности ГВС. Помимо определения конкретных размеров отдельных участков ГВТ, также были определены наиболее эффективные углы наклона завихряющих каналов (60 – 700 по отношению к оси ГВТ) для достижения наилучших

для данной конструкции плазматрона соотношений осевой и тангенциальной составляющих скорости ПОГ, обеспечивающих максимальные значения производительности и надежности работы. Оценка эффективности проектирования на начальном этапе производилась численными методами. На рис. 3 показана расчетная схема определения газодинамических параметров плазменно-дугового потока и его геометрии за пределами ГВТ плазматрона (включая зону воздействия на поверхность разрезаемого металла).

Представленные на рис. 3, 4 результаты газодинамического анализа на модельной (холодной) струе показывают при сопоставимых входных параметрах увеличение на 60 % средних и на 30 % максимальных скоростей в зоне плазменно-дугового воздействия на металл (торец П-образной траектории на 40-мм удалении от сопла плазматрона) по сравнению с широко применяемым в настоящее время плазматроном ПМВР-М, в котором используется общепринятая схема ГВТ (с несимметричной подачей ПОГ и одним завихрителем в ГВС). При этом более, чем в 2 раза возрастает и эффективность газодинамической стабилизации Z (процентное отношение среднего линейного отклонения параметров к их среднему значению), характеризующая равномерность распределения газодинамических характеристик (скорости для данного расчета) в контрольной зоне расчетной траектории:

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{|V_i - \bar{V}|}{\bar{V}}}{n} \cdot 100,$$

где \bar{V} – средняя скорость массива расчетных значений скорости; n – число расчетных точек.

Также на 20 – 30 % снижается и радиальный размер кинетического ядра плазменной струи (рис. 3, б), определяемый по геометрии зоны газо-плазменного истечения с максимальными скоростями. Существенно, что подобные выводы можно сделать и на других участках П-образной контрольной траектории, а также при расчете других кинетических параметров (удельных рас-

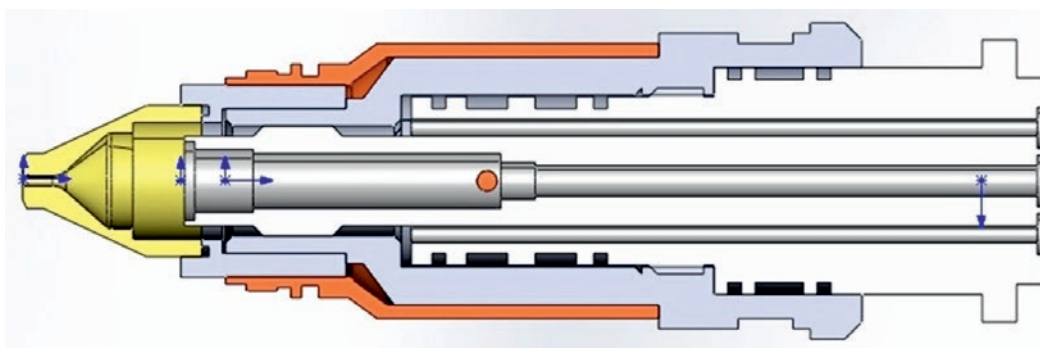


Рис. 2. Плазматрон ПМВР-5.3 для прецизионной резки металлов (конструктивная схема)

Fig. 2. PMVR-5.3 plasma torch for precision metal cutting (design diagram)

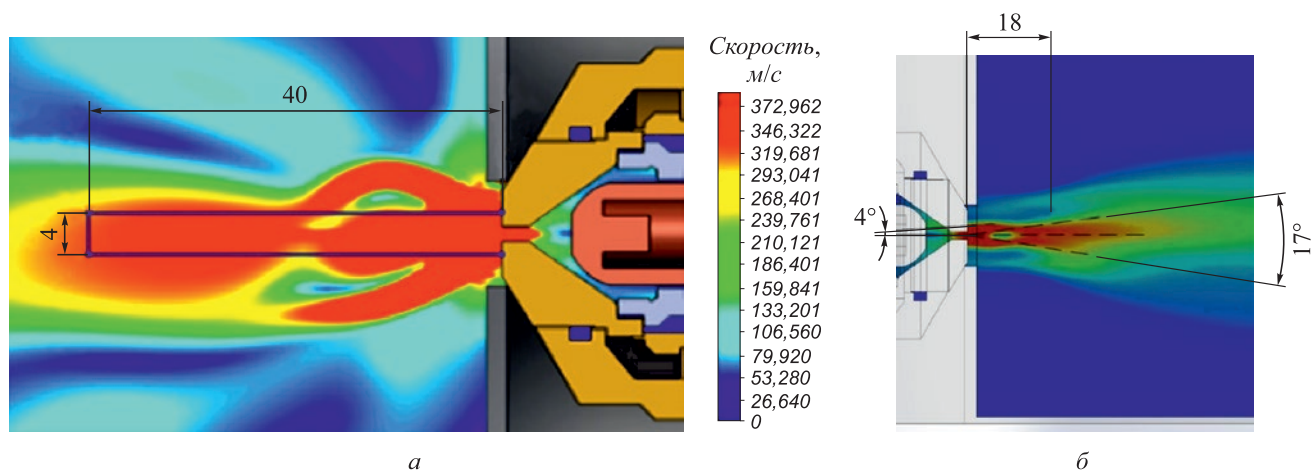


Рис. 3. Расчет параметров плазменной струи плазматрона ПМВР-5.3:
 а – схема расчета по П-образной траектории; б – оценка геометрии плазменной струи

Fig. 3. Calculation of plasma jet parameters for PMVR-5.3 plasma torch:
 а – calculation scheme for П-shaped trajectory; б – evaluation of plasma jet geometry

ходов и энергий) струи, включая и условия ее нагрева плазменной дугой. Очевидно, что повышение кинетических характеристик при более равномерном распределении параметров газо-плазменного потока должно существенно повлиять на улучшение эффективности, качества и надежности технологии.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

С целью экспериментального подтверждения результатов численного анализа эффективности проектирования плазматрона ПМВР-5.3 было выполнено исследование качества реза и кинетики структурообра-

зования зоны термического влияния (ЗТВ) при узко-струйной воздушно-плазменной прецизионной резке толстолистовой стальной полосы толщиной 40 мм. Следует заметить, что в данном случае под прецизионностью понимается ширина реза и соблюдение определенных геометрических характеристик поверхности реза, к которым можно отнести микрорельеф поверхности, угловой допуск (отклонение), образование грата в нижней части реза и брызг в верхней части, а также ширины зоны термического влияния, значения которых регламентированы ГОСТ 14972–80 [18]. По результатам параметрического анализа режимов плазменно-дуговой резки (вольт-амперной характеристики дуги, эффективности прожига, скорости и производительности резки) были определены оптимальные параметры работы плазматрона: ток резки 120 А; напряжение резки ~180 В; давление ПОГ ~4,5 атм; диаметр сопла 1,9 мм; вылет плазматрона 6 – 7 мм; скорость резки 0,3 м/мин.

Структурные исследования выполнены на микроскопе NEOPHOT-21 при увеличениях от 500 до 1000. Химический состав листовой стали определяли спектральным методом на приборе SPECTROMAX и усредняли по прожигам в нескольких точках на поверхности сечения образца. Для идентификации определения возможного разброса данных по химическому составу исследуемой стали анализировали концентрацию всех компонентов на различных произвольно выбранных участках по толщине листа. С целью определения распределения химических элементов на поверхности реза проведен микрорентгеноспектральный анализ при увеличении 2000 на растровом электронном микроскопе TESCAN VEGA PIXMU, оснащенный системами энергодисперсионного микроанализа INCA ENERGY 450 с АДД детектором OXFORD и программным обеспечением INCA. Исследование рельефа поверхности резов выполнено с помощью оптического интерферометра

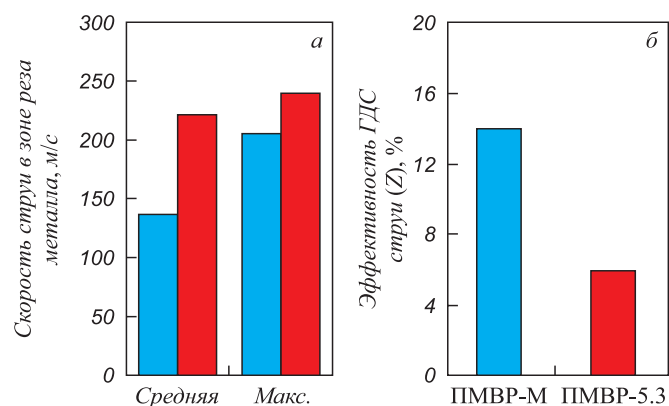


Рис. 4. Сравнительный анализ скоростей (а) и критерия эффективности газодинамической стабилизации Z (б) в зоне воздействия плазменной струи на металл:

■ – ПМВР-М; ■ – ПМВР-5.3;
 (П-образная траектория – см. рис. 3, холодная струя)

Fig. 4. Comparative analysis of velocities (а) and efficiency criterion of gas-dynamic stabilization Z (б) in the zone of plasma jet impact on the metal:

■ – PMVR-M; ■ – PMVR-5.3;
 (П-shaped trajectory - see Fig. 3, cold jet)

Химический состав исследуемой стали, %

Table 1. Chemical composition of the studied steel, %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al
0,145	0,215	0,441	0,020	0,012	0,136	0,220	0,021	0,0088
Cu	Co	Ti	Nb	V	W	Pb	Mg	B
0,180	0,017	<0,0010	<0,0040	<0,0010	<0,0017	<0,0066	<0,0010	<0,0015
Sn	Zn	As	Bi	Ca	Ce	Zr	La	Fe
0,0083	<0,0020	0,015	0,012	0,0007	<0,0030	0,0025	<0,0010	98,5

Veeco NT-1100. Значение твердости определены на приборе LEICA с программным обеспечением Materials Workstation при нагрузке 25 и 1000 г на верхней и нижней кромке реза.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1 представлены результаты анализа химического состава исследуемой стали по всем выбранным компонентам, характеризующим марочный состав листовых материалов.

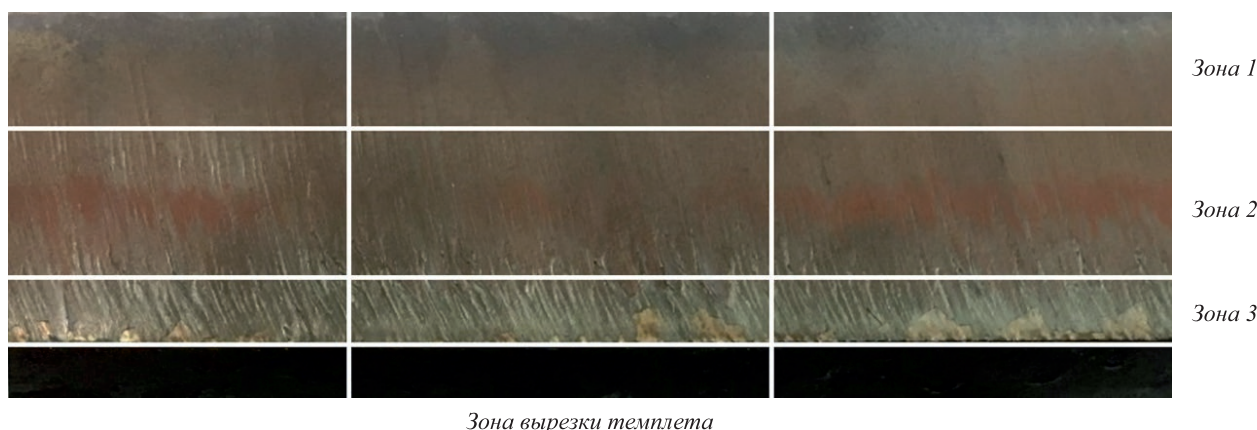
В соответствии с ГОСТ 380–2005 «Сталь углеродистая обыкновенного качества» исследуемые образцы могут быть идентифицированы как сталь Ст3пс, массовая доля основных компонентов которой находится в пределах допуска для листового горячекатаного проката.

Визуальный анализ поверхности реза листа, подвергнутого плазменной резке по выбранным режимам, позволил определить параметры качества и геометрию кромок реза при использовании рассматриваемого плазматрона. Как показал внешний контроль (рис. 5), макрокартина реза на всех исследуемых участках по длине образца на нижних кромках практически идентична и здесь не обнаружено образование грата и на-

липания капель расплавленного металла. Кроме того, не выявлено оплавления и скругления верхней кромки, что обеспечило практически нулевое угловое отклонение реза, чему способствовало максимально возможное обжатие дуги при реализации узкоструйной плазменно-воздушной резки материалов. Также весьма важным результатом является отсутствие значительной осцилляции дуги при выбранных скоростях плазменной резки, что позволило получить минимальную волнистость линии реза.

Однако зона с волнистой поверхностью не захватывает всю поверхность реза и по толщине листа, начиная с верхней кромки, можно выделить три характерные горизонтальные зоны, которые условно обозначить как гладкая (рис. 5, зона 1), промежуточная (рис. 5, зона 2) и волнистая (рис. 5, зона 3). По ширине эти зоны имеют разную протяженность, причем волнистая в среднем составляет не более 20 % площади поверхности реза. Важно отметить, что при выбранных параметрах работы плазматрона ширина реза по всей длине разделки не превышала 3 мм, что хорошо согласуется с данными, приведенными в работе [19].

Как известно, в процессе тепловой резки в связи с быстрым перемещением концентрированного источника нагрева относительно поверхности разрезаемо-



Зона вырезки темплета

Рис. 5 Внешний вид поверхности реза листа после плазменной обработки

Fig. 5. Appearance of the plate cut surface after plasma treatment

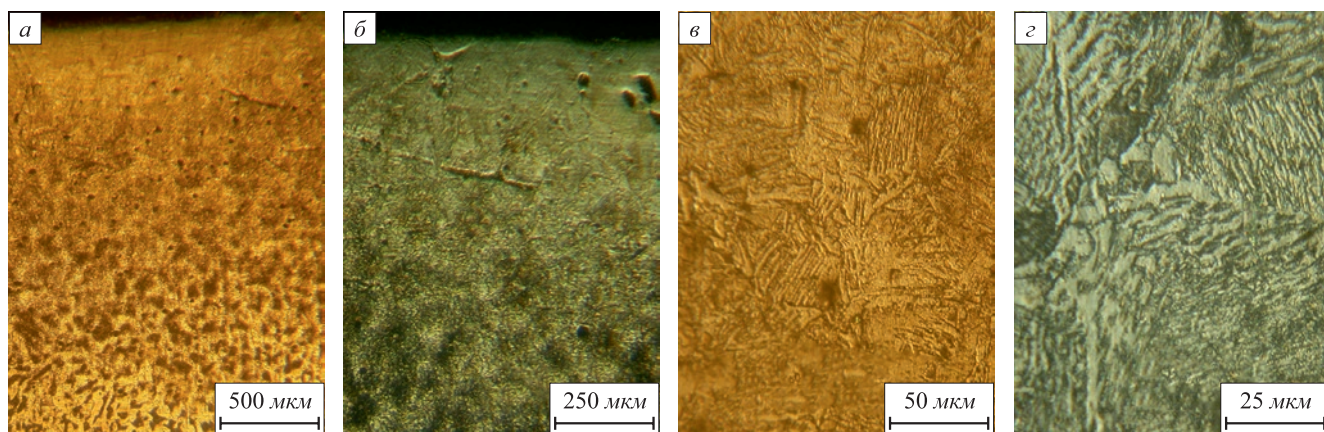


Рис. 6. Микроструктура приповерхностных слоев исследуемой стали в зависимости от кратности увеличения

Fig. 6. Microstructure of the steel near-surface layers depending on magnification factor

го металла наблюдается большой перепад температур (от температуры плавления до исходной) на сравнительно узком участке, прилегающем к поверхности реза. В результате в кромках металла происходят металлургические процессы, сопровождающиеся изменением химического состава, структуры и механических свойств по сравнению с исходным состоянием. При этом структурные превращения в условиях термической резки металлов значительно отличаются от превращений при обычной термической обработке. В этом случае распад твердых растворов в зоне резки протекает в более сложной и непрерывно изменяющейся обстановке, а наличие химической неоднородности в зоне термического нагрева во многих случаях существенно изменяет кинетику распада твердых растворов [20, 21]. Как следствие, протекающие в зоне реза процессы кристаллизации металла и структурные превращения чаще всего обуславливают последующие технологические и эксплуатационные свойства в этой зоне.

На рис. 6 представлена микроструктура приповерхностных слоев исследуемой стали после плазменной резки в зависимости от кратности увеличения.

Особый интерес в рассматриваемом случае представляют исследования тепловых процессов, протекающих в зоне резки (термического нагрева/плавления), от структуры и химического состава которой зависят свойства зоны термического влияния. В результате термической резки установлено образование условных участков от зоны плавления до основного металла. В целом можно считать, что весь разделочный шов представляет собой зону термического влияния вплоть до исходного состояния стали. Проведенное пошаговое измерение твердости с интервалом в 50 мкм, начиная от края реза со стороны верхней кромки, позволило установить ширину этой зоны, размеры которой зависят от химического состава и толщины разрезаемого металла. В данном случае, в соответствии с параметрическими

условиями эксперимента, ее ширина была определена на уровне примерно 1000 мкм (рис. 7).

По структурному состоянию ЗТВ следует разделить на три субзоны:

I – зона критического перегрева (ЗКП) вблизи поверхности реза в виде светлой полосы бесструктурного мартенсита, где температуры близки к температурам плавления;

II – зона нагрева в аустенитное состояние, т. е. зона фазовой перекристаллизации (ЗФП) с закалочными структурами;

III – зона нагрева до температур ниже температуры эвтектоидного превращения стали, в которой формируются переходные структуры, поэтому ее следует называть переходной зоной (ПЗ).

Анализ микроструктур позволил обнаружить значительные изменения в структурообразовании субзон *II* и *III* ЗТВ в исследуемых образцах. Так, на поверхности реза в ЗКП образовался не травящийся белый слой бесструктурного мартенсита, а в структурах ЗФП и ПЗ сформировалась различная зеренная структура. Относительно невысокая скорость резания (0,3 м/мин), выб-

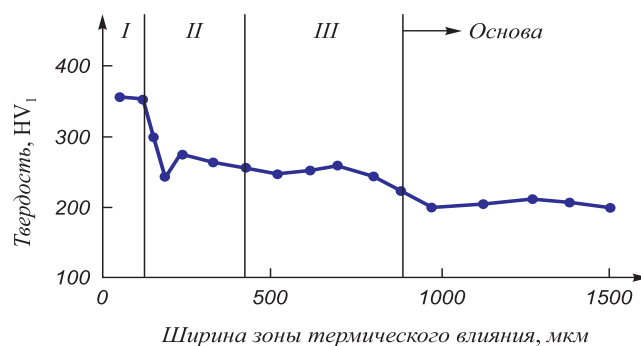


Рис. 7. График изменения твердости по ширине зоны термического влияния

Fig. 7. Graph of hardness change over the width of the thermal impact zone

Структура образца в субзонах зоны термического влияния

Table 2. Sample structure in subzones of thermal impact

Толщина образца, мм	Зона	Толщина зоны, мм	Структура
40	I (ЗКП)	25	Бесструктурный мартенсит
	II (ЗФП)	390	Среднепластинчатый перлит, 7 балл, межпластинчатое расстояние менее 1,20 мкм
	III (ПЗ)	800	Перлитно-ферритная структура с соотношением п/ф = 85/15
	Основа стали	>1000	Перлитно-ферритная структура с соотношением п/ф = 20/80

ранная для раскроя толстолистовой стали, обусловила за счет перекристаллизации формирование структуры укрупненного зерна среднепластинчатого перлита 7 балла. При этом в переходной субзоне ПЗ резко возросло количество перлита в перлитно-ферритной структуре по сравнению с исходным соотношением в основе стали (табл. 2).

Подобные особенности структурообразования в значительной степени определяются перераспределением легирующих элементов в исследуемой стали и, главным образом, углерода в процессе энергетической обработки. Микрорентгеноспектральный анализ показал (рис. 8), что в результате диффузионного перераспределения углерода значительно повысилась его концентрация в субзоне ЗКП, которая достигла значений в кромке реза 0,76 % (по массе) при усредненной концентрации углерода в основе 0,14 % (по массе). Необходимо отметить, что на приведенном графике распределения элементов отчетливо видно нерегулярное распределение углерода в различных зонах реза. Концентрация углерода максимально повышается в зоне оплавления вблизи кромки реза, затем снижается до значений 0,35 – 0,45 % (по массе) в подзоне ЗФП и выравнивается к концу переходной зоны в соответ-

ствии с химическим составом основы. Все это в полной мере отражает морфологию образовавшихся структур в различных зонах реза по мере удаления от кромки. Также на графике в зоне оплавления в результате интенсивной энергетической обработки в зоне реза за счет выгорания обнаруживается значительное снижение массовой доли марганца и кремния по сравнению с исходным.

В связи с тем, что эти элементы в углеродистой стали являются постоянными технологическими примесями, их концентрация незначительна и подобное уменьшение количества в приповерхностных слоях реза существенного значения не имеет. В тоже время, значительное насыщение поверхностных слоев углеродом привело к резкому повышению твердости наружных кромок реза на глубину 25 мкм (рис. 9). За счет интенсивного теплоотвода в этой зоне произошла самозакалка стали с образованием прослойки бесструктурного мартенсита на глубину до 10 мкм, под которой до окончания субзоны ЗКП в структуре присутствует, по-видимому, бейнит, представляющий собой феррито-карбидную смесь высокой дисперсности. Важно отметить практически одинаковый характер распределения твердости на верхней и нижней кромках реза толстолистовой

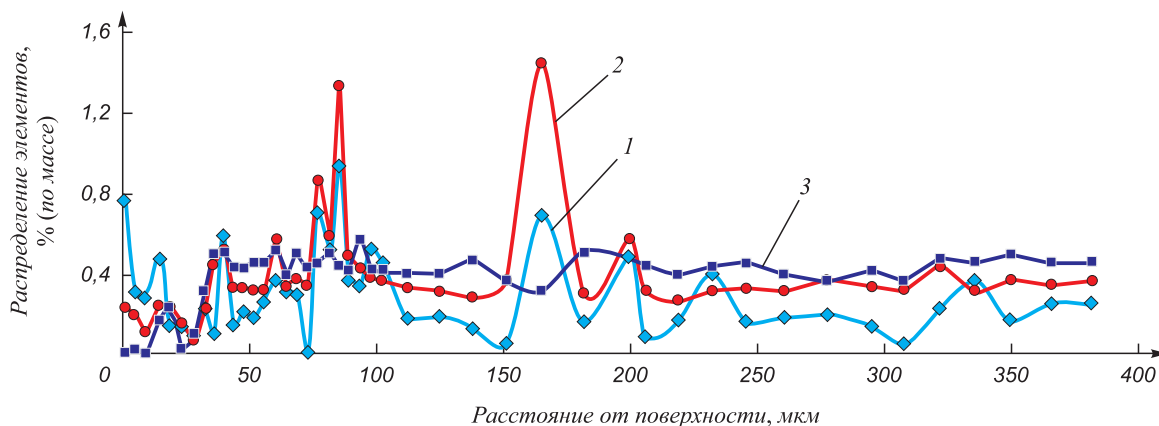


Рис. 8. Распределение легирующих элементов и углерода в ЗТВ (сталь Ст3пс):
1 – C; 2 – Si; 3 – Mn

Fig. 8. Distribution of alloying elements and carbon in the thermal impact zone (St3ps steel) :
1 – C; 2 – Si; 3 – Mn

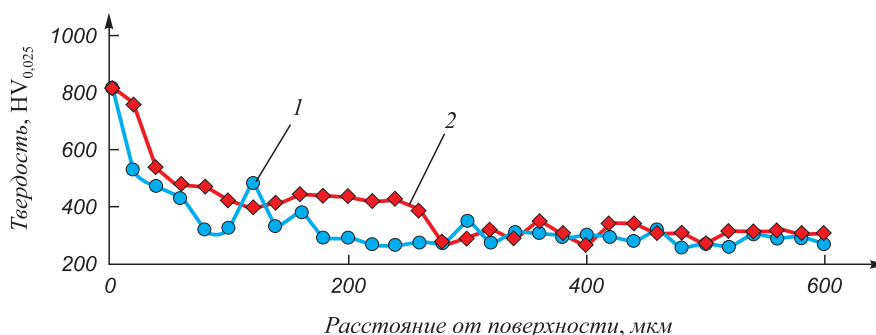


Рис. 9. Распределение твердости по краям поверхности реза:
1 – нижняя кромка; 2 – верхняя кромка

Fig. 9. Hardness distribution along the edges of the cut surface:
1 – lower edge; 2 – top edge

стали, что обусловлено высокой эффективностью ГВС узкоструйного плазматрона на всем протяжении газоплазменного воздействия (в пределах толщины разрезаемого металла).

Большое значение при оценке качества плазменной резки отводится изучению шероховатости поверхности по критериям микрогеометрии рельефа линии реза. Результаты исследования представлены на рис. 10 и в табл. 3. Видно, что по всем показателям качества микрорельеф поверхности после плазменной резки соизмерим с механической обработкой поверхности

после фрезерования и соответствует второму классу качества шероховатости по чистоте поверхности (ГОСТ 14792–80).

Выводы

По результатам выполненных исследований можно заключить, что технические возможности разработанного плазматрона ПМВР-5.3, достигнутые за счет использования новой системы ГВС с двумя завихрителями и расширительными камерами, а также симмет-

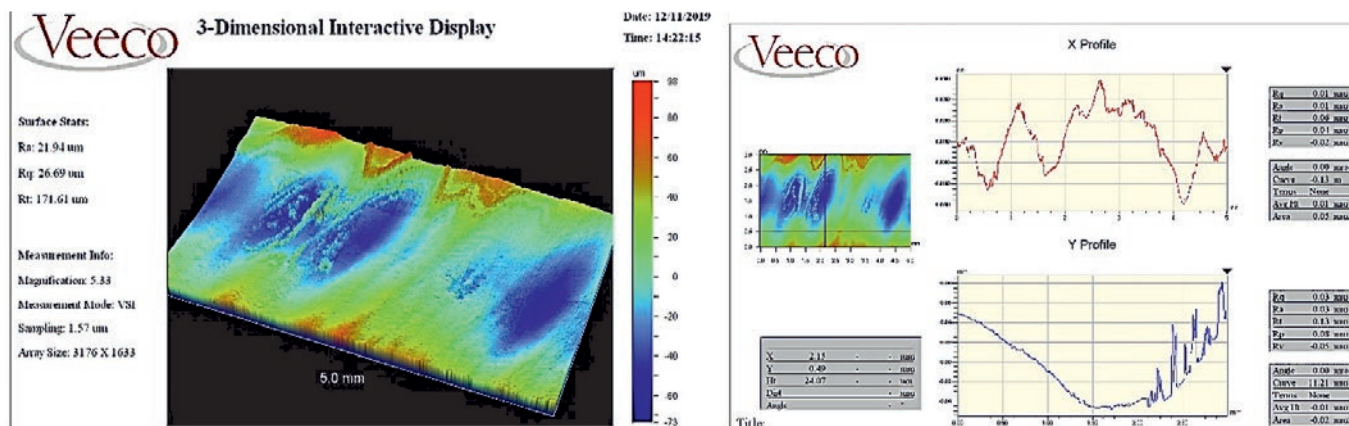


Рис. 10. Анализ рельефа поверхности после плазменной резки

Fig. 10. Analysis of the surface relief after plasma cutting

Таблица 3

Шероховатость поверхности реза

Table 3. Roughness of the cut surface

Вид обработки	Средняя шероховатость R_a , мкм	Средняя квадратичная шероховатость R_q , мкм	Абсолютная шероховатость $R_t (R_z)$, мкм
Плазменная резка	21,94	26,69	171,61
Фрезерование ГОСТ 2789–73	20,00	25,00	160,00

ричной подачей ПОГ, позволяют проводить достаточно качественный раскрой листовой стали в условиях узкоструйной воздушно-плазменной резки в довольно широком диапазоне толщин вплоть до 40 мм и более. Однако необходимо учитывать, что при больших толщинах формируется весьма протяженная ЗТВ со значи-

тельными изменениями в структуре основного металла и ряда других показателей, из-за чего сварку заготовок без предварительной механической обработки можно производить при толщине реза не более 20 мм, а при больших толщинах предполагается снятие фаски с поверхности реза на глубину не менее 1,0 мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Krink V., Simler H., Laurisch F. Plasmaschneidtechnologie – Erweiterung wirtschaftlicher Anwendungsgebiete // ICCT 2006: Internationale Schneidtechnische Tagung; Vorträge der gleichnamigen Konferenz: Hannover, 10 und 11. Oktober 2006. P. 18–25.
2. Mussmann J. Stand der Bearbeitung von ISO 4063:2009 “Schweißen und verwandte Prozesse – Liste der Prozesse und Ordnungsnummern” // Schweissen und Schneiden. 2010. No. 7–8. P. 430–433.
3. Krink V. Plasmaschneiden – ein vielseitiges Verfahren zum Schneiden dünner und dicker Bleche // DVS Congress 2010. Vorträge der Veranstaltung vom 26–28. September 2010 in Nürnberg. P. 73–78.
4. Эсибян Э.М. Воздушно-плазменная резка: состояние и перспективы // Автоматическая сварка. 2000. № 12. С. 6–20.
5. Антипов Н.А., Медко В.С. Определение дефектного приповерхностного слоя при воздушно-плазменной резке заготовок из углеродистой низколегированной стали // Электрофизические и электрохимические методы обработки. 2014. № 2(80). С. 25–27.
6. Васильев А.Н., Внук В.В., Зиновьев В.И., Коткина Т.В. Сравнительные исследования воздушно-плазменной и кислородно-плазменной резки // Известия МГТУ. 2014. № 2(20). С. 13–18.
7. Gesteigerte Produktivität durch neueste Plasmaschneidtechnologie // Schweissen und Schneiden. 2008. No. 9. P. 458–459.
8. Nachbargauer K. Mit Schneidhohmodus beim Plasmaschneiden reproduzierbare Schneidergebnisse erzielen // DVS Congress 2010. Vorträge der Veranstaltung vom 26–28. September 2010 in Nürnberg. P. 95–96.
9. Wegmann H., Gesthuysen F.-J., Holthaus M. Plasma cutting – an economically viable process for mild and low-alloy steels // Welding and Cutting. 2005. Vol. 4. No. 4. P. 191–194.
10. Анахов С.В. Принципы и методы проектирования плазматронов. Екатеринбург: Издательство РГППУ, 2018. 163 с.
11. Conrads H., Schmidt M. Plasma generation and plasma sources // Plasma Sources Science and Technology. 2000. Vol. 9. No. 4. P. 441–454. <https://doi.org/10.1088/0963-0252/9/4/301>
12. Venkatramani N. Industrial plasma torches and applications // Current Science. 2002. Vol. 83. No. 3. P. 254–262.
13. Локтионов А.А. Оценка качества реза листовых материалов при тонкоструйной плазменной резке // Обработка металлов. 2013. № 4(61). С. 85–89.
14. Рахимьянов Х.М., Локтионов А.А., Никитин Ю.В. Оценка геометрической точности реза листовых материалов при различных технологиях тонкоструйной плазменной резки // Обработка металлов. 2013. № 3(60). С. 25–30.
15. Kirkpatrick I. High definition plasma – an alternative to laser technology // Aircraft Engineering and Aerospace Technology. 1998. Vol. 70. No. 3. P. 215–217. <https://doi.org/10.1108/00022669810370349>
16. Дресвин С.В., Зверев С.Г. Плазматроны: конструкции, параметры, технологии. Санкт-Петербург: Издательство Политехнического университета, 2010. 56 с.
17. Анахов С.В., Пыкин Ю.А., Матушкин А.В. Повышение эффективности системы газовой стабилизации в плазматронах для высокоточной резки металлов // Сварочное производство. 2019. № 4. С. 27–30.
18. ГОСТ 14792–80. Детали и заготовки, вырезаемые кислородной и плазменно-дуговой резкой. Точность, качество поверхности реза. Москва: Издательство стандартов, 1980. 6 с.
1. Krink V., Simler H., Laurisch F. Plasmaschneidtechnologie – Erweiterung wirtschaftlicher Anwendungsgebiete. ICCT 2006: Internationale Schneidtechnische Tagung; Vorträge der gleichnamigen Konferenz; Hannover, 10 und 11. Oktober 2006, pp. 18-25. (In Germ.).
2. Mussmann J. Stand der Bearbeitung von ISO 4063:2009 “Schweißen und verwandte Prozesse – Liste der Prozesse und Ordnungsnummern”. Schweissen und Schneiden. 2010, no. 7–8, pp. 430–433. (In Germ.).
3. Krink V. Plasmaschneiden – ein vielseitiges Verfahren zum Schneiden dünner und dicker Bleche. DVS Congress 2010. Vorträge der Veranstaltung vom 26-28. September 2010 in Nürnberg, pp. 73–78. (In Germ.).
4. Esibyan E.M. Air-plasma cutting: State and prospects. Avtomaticheskaya svarka. 2000, no. 12, pp. 6–20. (In Russ.).
5. Antipov N.A., Medko V.S. Determination of a defective near-surface layer during air-plasma cutting of blanks made of carbon low-alloy steel. Elektrofizicheskie i elektrokhimicheskie metody obrabotki. 2014, no. 2(80), pp. 25–27. (In Russ.).
6. Vasil'ev A.N., Vnuk V.V., Zinov'ev V.I., Kot'kina T.V. Comparative study of air-plasma and plasma-arc cutting. Izvestiya MGTU. 2014, no. 2(20), pp. 13–18. (In Russ.).
7. Gesteigerte Produktivität durch neueste Plasmaschneidtechnologie. Schweissen und Schneiden. 2008, no. 9, pp. 458–459. (In Germ.).
8. Nachbargauer K. Mit Schneidhohmodus beim Plasmaschneiden reproduzierbare Schneidergebnisse erzielen. DVS Congress 2010. Vorträge der Veranstaltung vom 26-28. September 2010 in Nürnberg, pp. 95–96. (In Germ.).
9. Wegmann H., Gesthuysen F.-J., Holthaus M. Plasma cutting – an economically viable process for mild and low-alloy steels. Welding and Cutting. 2005, vol. 4, no. 4, pp. 191–194.
10. Anakhov S.V. Principles and Methods of Plasma Torches Design. Yekaterinburg: Izd-vo RSVPU, 2018, 163 p. (In Russ.).
11. Conrads H., Schmidt M. Plasma generation and plasma sources. Plasma Sources Science and Technology. 2000, vol. 9, no. 4, pp. 441-454. <https://doi.org/10.1088/0963-0252/9/4/301>
12. Venkatramani N. Industrial plasma torches and applications. Current Science. 2002, vol. 83, no. 3, pp. 254–262.
13. Loktionov A.A. Assessment of a cut of quality of sheet materials in the conditions of high-precision plasma cutting. Obrabotka metallov. 2013, no. 4(61), pp. 85-89. (In Russ.).
14. Rakhimyanov H.M., Loktionov A.A., Nikitin Yu.V. Evaluation of geometric precision cut of sheet materials with different high-precision plasma cutting technologies. Obrabotka metallov. 2013, no. 3(60), pp. 25–30. (In Russ.).
15. Kirkpatrick I. High definition plasma – an alternative to laser technology. Aircraft Engineering and Aerospace Technology. 1998, vol. 70, no. 3, pp. 215–217. <https://doi.org/10.1108/00022669810370349>
16. Dresvin S.V., Zverev S.G. Plasma Torches: Designs, Parameters, Technologies. St. Petersburg: izd-vo Politekhnikheskogo un-ta, 2010, 56 p. (In Russ.).
17. Anakhov S.V., Pykin Yu.A., Matushkin A.V. Improving the effectiveness of individual gaseous-vortex stabilization in plasma torches for precision cutting of metals. Svarochnoe proizvodstvo. 2019, no. 4, pp. 27–30. (In Russ.).
18. GOST 14792-80. Parts and blanks cut by oxygen and plasma arc cutting. Accuracy, quality of the cutting surface. Moscow: Izd-vo standartov, 1980, 6 p. (In Russ.).

19. Сухоруков Н.В., Смоленцев Е.В. Технология плазменной обработки при разделении материалов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2009. Т. 5. № 12. С. 1–3.
20. Сумец А.В., Кассов В.Д. Закономерности структурообразования зоны термического влияния при резке металлов // Вестник ХНАДУ. 2017. Вып. 77. С. 166–170.
21. Лященко Г.И. Качество реза при плазменно-дуговой резке // Сварщик. 2012. № 4. С. 34–39.
19. Sukhorukov N.V., Smolentsev E.V. Technology of plasma processing in materials separation. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2009, vol. 5, no. 12, pp. 1–3. (In Russ.).
20. Sumets A.V., Kassov V.D. Regularities of structure formation of heat affected zone at metals cutting. *Vestnik KhNADU*. 2017, no. 77, pp. 166–170. (In Russ.).
21. Lyashchenko G.I. Quality in plasma-arc cutting. *Svarshchik*. 2012, no. 4, pp. 34–39. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Сергей Вадимович Анахов, к.ф.-м.н., доцент, заведующий кафедрой математических и естественнонаучных дисциплин, Российский государственный профессионально-педагогический университет

ORCID: 0000-0003-1460-6305

E-mail: sergej.anahov@rsvpu.ru

Борис Николаевич Гузанов, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой инжиниринга и профессионального обучения в машиностроении и металлургии, Российский государственный профессионально-педагогический университет

ORCID: 0000-0001-5698-0018

E-mail: boris.guzanov@rsvpu.ru

Анатолий Владимирович Матушкин, к.т.н., доцент кафедры технологии сварочного производства, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

ORCID: 0000-0001-7309-1618

E-mail: 227433@yandex.ru

Sergei V. Anakhov, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assist. Prof., Head of the Chair of Mathematic and Natural Sciences, Russian State Professional Pedagogical University

ORCID: 0000-0003-1460-6305

E-mail: sergej.anahov@rsvpu.ru

Boris N. Guzanov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Chair of Engineering and Vocational Training in Machinery and Metallurgy, Russian State Professional Pedagogical University

ORCID: 0000-0001-5698-0018

E-mail: boris.guzanov@rsvpu.ru

Anatolii V. Matushkin, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair "Welding Technology", Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

ORCID: 0000-0001-7309-1618

E-mail: 227433@yandex.ru

ВКЛАД АВТОРОВ

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

С. В. Анахов – научное руководство, анализ результатов исследований, подготовка текста, формирование выводов.

Б. Н. Гузанов – формирование основной концепции, цели и задачи исследования, доработка текста, корректировка выводов.

А. В. Матушкин – проведение экспериментов и расчетов.

S. V. Anakhov – scientific leadership, analysis of the research results, writing the text, conclusions formation.

B. N. Guzanov – formation of the research main concept, goals and objectives; revising the text, conclusions correction.

A. V. Matushkin – carrying out experiments and calculations.

Поступила в редакцию 17.12.2021

После доработки 20.12.2021

Принята к публикации 25.12.2021

Received 17.12.2021

Revised 20.12.2021

Accepted 25.12.2021