

УДК 621.9.01; 621.791.947.55
DOI: 10.12737/article_591947e1367747.15873002

Х.М. Рахимьянов, д.т.н.,
А.Х. Рахимьянов, к.т.н.
(Новосибирский государственный технический университет,
630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20)
E-mail: kharis51@mail.ru; centerfht@mail.ru

Влияние кинематической вязкости расплава материалов на качество обработки при тонкоструйной плазменной резке биметаллических композиций

Рассмотрены вопросы влияния кинематической вязкости расплавов материалов на точность и качество обработки биметаллических композиций при тонкоструйной плазменной резке.

Ключевые слова: тонкоструйная плазменная резка; биметаллические композиции; точность и качество реза; кинематическая вязкость расплава.

Kh.M. Rakhimyanov, D. Eng.,
A. Kh. Rakhimyanov, Can. Eng.
(Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marks Avenue, Novosibirsk 630073)

Influence of material melt kinematic viscosity upon treatment quality at fine-jet plasma cutting of bimetallic compositions

The paper reports the peculiarities in the formation of a cut slot of bimetallic "steel 3 + aluminum 5 M" composition and "steel 3 + copper M1" composition at fine-jet plasma cutting. A different character of a cut channel formation of compositions at a package cut on different sides is revealed. When processing "steel + aluminum" composition on the side of steel a cut surface on the aluminum area has coarse roughness. A burr formation on the lower edge of a cut is also observed. It is explained by considerable difference in melting temperatures and thermal conduction of steel and aluminum. At the changed of a front side of a cut from steel to aluminum occurs sedimentation of aluminum melt on the steel area which is explained by a high kinematic viscosity of aluminum melt. The formation of refractory oxides in aluminum melt is defined that contributes to the increase of its viscosity and difficulty in the complete elimination from a cut channel. At the cutting of bimetallic "steel 3 + copper M1" composition of a copper side a cut surface on both areas is formed without visible traces of sedimentation of steel and copper melt caused by a low kinematic viscosity of copper and steel melts.

Keywords: fine-jet plasma cutting; bimetallic compositions; cut accuracy and quality; melt kinematic viscosity.

В условиях современного производства стоит задача повышения его эффективности на всех стадиях, в том числе и заготовительной. Достижение высоких показателей точности обработки на этапе заготовительного про-

изводства определяет дальнейшее развитие технологического процесса.

Для реализации поставленной задачи широкое распространение получило внедрение современных технологий раскроя листового

материала, таких как лазерная, гидроабразивная, плазменная, в том числе ее современная разновидность – тонкоструйная плазменная резка.

Согласно материалам, представленным крупнейшим производителем оборудования для термической резки – фирмой Hypertherm (США), тонкоструйная плазменная резка является весьма эффективным методом раскроя листовых материалов в широком диапазоне толщин в условиях серийного производства.

Эффективность данной технологии также подтверждена результатами экспериментальных исследований по оценке точности [1], качества [2] при раскрое конструкционных углеродистых [3], нержавеющей [4] сталей, медных [5] и алюминиевых [6] сплавов.

Исследования, направленные на расширение технологических возможностей тонкоструйной плазменной резки в части обработки биметаллических композиций, представляющих собой соединение разнородных металлических материалов, также показали перспективы данной технологии для раскроя этого класса материалов [7 – 9].

Однако остается открытым вопрос, какие факторы влияют на качество поверхности реза биметаллических композиций при тонкоструйной плазменной резке.

Данная работа посвящена выявлению влияния кинематической вязкости расплава материалов, составляющих биметаллические соединения, на точность и качество раскроя при

тонкоструйной плазменной резке.

Экспериментальные исследования проводились на технологическом комплексе тонкоструйной плазменной резки, подробно описанном в работе [3]. В качестве материала для исследований были выбраны биметаллические композиции «сталь Ст3 + алюминий А5М» и «сталь Ст3 + медь М1». Композиции были получены сваркой взрывом в лаборатории физики взрыва Института Гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН (г. Новосибирск). В качестве плакируемого материала в обеих композициях использовался листовый прокат стали Ст3 (ГОСТ 380-2005) толщиной 3 мм.

Биметаллическая композиция «сталь + алюминий» имеет хорошие перспективы как конструкционный материал, обладающий достаточной конструктивной прочностью. Плакирующим материалом в данной паре служил алюминий марки А5М (ГОСТ 21631-76) в виде листового проката толщиной 3 мм.

Выбор меди в качестве плакирующего элемента во второй биметаллической композиции позволяет создать материал, обладающий хорошими антифрикционными свойствами с одной стороны, и обеспечивающий достаточную конструктивную прочность, с другой. В композиции со сталью Ст3 использовался листовый прокат меди марки М1 (ГОСТ 495-92) толщиной 2 мм.

Теплофизические характеристики материалов, используемых в композициях, представлены в таблице.

Теплофизические характеристики стали Ст3, алюминия А5М и меди М1

Марка материала	Плотность, г/см ³	Теплоемкость, кал/г·град	Теплопроводность, ккал/м·ч·град			Температура плавления, °С	Удельная теплота плавления, кДж/кг
			20 °С	200 °С	500 °С		
Сталь Ст3	7,80	0,1077	63	53	37	1539	277
Алюминий А5М	2,70	0,2129	197	197	197	660	390
Медь М1	9,0	0,0913	330	321	309	1083	213

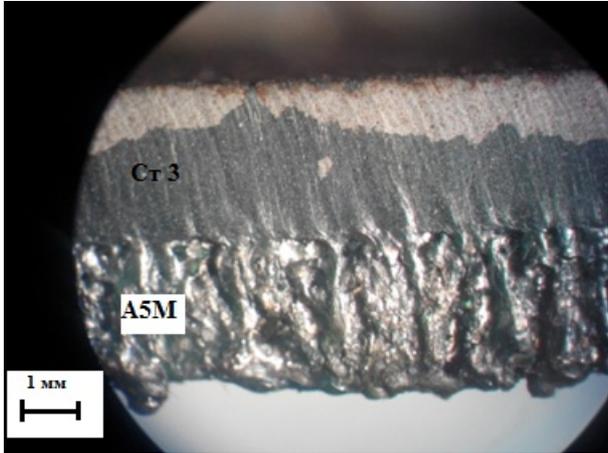
Изучение структурно-фазового состояния материалов в зоне реза проводилось методом оптической микроскопии на микроскопе мод. Axio Observer Alm при съемке камерой AxioCam MRc5. Анализ результатов химических процессов, протекающих в канале реза при тонкоструйной плазменной резке, проводился методом рентгеновской дифрактометрии на дифрактометре модели ARL X'TRA с использованием медной рентгеновской трубки в качестве источника излучения.

Для выявления оптимальной схемы обработки биметаллических композиций раскрой необходимо проводить по технологическим схемам, предназначенным для материалов, составляющих данные композиции, при этом меняя лобовую сторону раскроя.

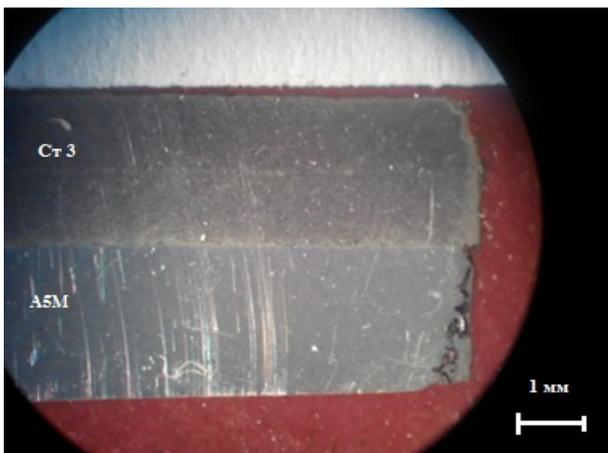
Раскрой биметаллической композиции «сталь Ст3 + алюминий А5М» проводили по технологическим схемам Hi-Focus^{plus} и Hi-Focus [10].

На рис. 1 (а, б) показан внешний вид и гео-

метрии поверхности реза исследуемой композиции. Для стальной составляющей биметалла характерна высокая точность реза (отклонение от перпендикулярности составляет $1...2^\circ$) и малое значение шероховатости ($Ra = 2,0...2,5$ мкм).



а)



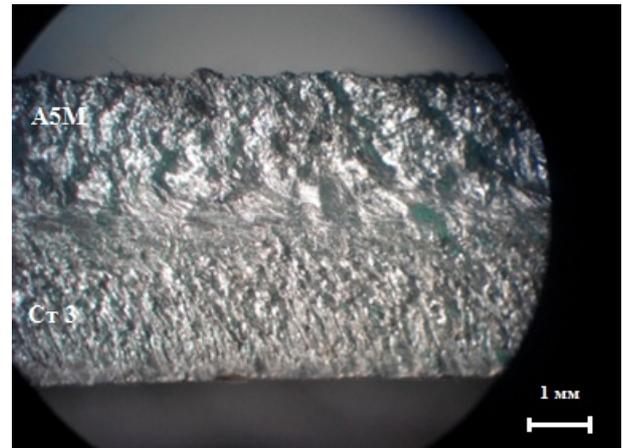
б)

Рис. 1. Внешний вид поверхности (а) и геометрия (б) реза композиции «сталь Ст3 + алюминий А5М» при раскросе по технологической схеме Ni – Focus^{plus} ($I = 50$ А, $v = 1,5$ м/мин); рез со стороны стали Ст3

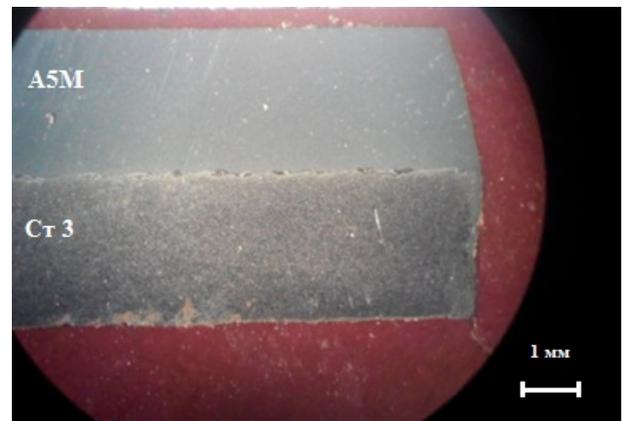
В зоне алюминиевой составляющей поверхность реза гораздо худшего качества с кратерами, шероховатость которой традиционными методами количественно оценить не представляется возможным. Также наблюдается небольшое количество грата на нижней кромке реза. Причины подобного формирования канала реза объясняются значительной разницей в температурах плавления и теплопроводностях стали и алюминия, что подробно описано в работе [10].

Иной характер формирования канала реза исследуемой композиции наблюдается при

смене лобовой стороны раскроса со стали на алюминий. Внешний вид поверхности реза и его геометрия показаны на рис. 2.



а)



б)

Рис. 2. Внешний вид поверхности (а) и геометрия (б) реза композиции «сталь Ст3 + алюминий А5М» при раскросе по технологической схеме Ni – Focus^{plus} ($I = 50$ А, $v = 1,7$ м/мин); рез со стороны алюминия А5М

Анализ морфологии поверхности реза биметалла (см. рис. 2, а) на верхнем участке (алюминий) показывает на характерный для плазменного раскроса металла рельеф в виде следов воздействия плазменной дуги. На нижнем участке (сталь) подобного рельефа не наблюдается. Следует ожидать, что воздействие плазменной дуги на участке стальной составляющей будет происходить через слой удаленного алюминиевого расплава, что и обуславливает формирование подобного рельефа поверхности в нижней части биметалла. Наличие расплава алюминия на участке стали иллюстрирует рис. 2, б.

Осаждение расплава алюминия на участке стали обусловлено как его изначально высо-

кой кинематической вязкостью, так и ее повышением в процессе обработки за счет образования оксида алюминия.

Эффективность истечения продуктов расплава из зоны реза во многом определяется его вязкостью. Так, движение реальных расплавов сопровождается возникновением сил трения между слоями жидкости. Известно, что отношение сил трения к единице площади пропорционально градиенту скорости перемещения слоев. Коэффициент пропорциональности является характеристикой конкретного расплава в определенных температурных условиях и называется коэффициентом динамической вязкости.

Несмотря на то, что в интервале температур плавления (~700 °С) расплав алюминия имеет меньшее значение коэффициента динамической вязкости (2,9 мПа·с) по сравнению со сталью (4,5...6,0 мПа·с в интервале температур плавления 1480...1680 °С), характер течения расплава по каналу реза будет определяться значением его кинематической вязкости. Последняя определяется как отношение коэффициента динамической вязкости к плотности расплава. Учитывая, что алюминий обладает наименьшей плотностью (по сравнению со сталью), значение кинематической вязкости его расплава оказывается максимальным ($1,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ – для алюминия, $(0,64...0,83) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ – для сталей).

Также следует отметить, что при раскросе алюминия, в его расплаве происходит образование тугоплавких оксидов алюминия при взаимодействии с растворенным кислородом воздуха, используемого в качестве плазмообразующего газа, что подтверждают результаты рентгенофазового анализа (рис. 3).

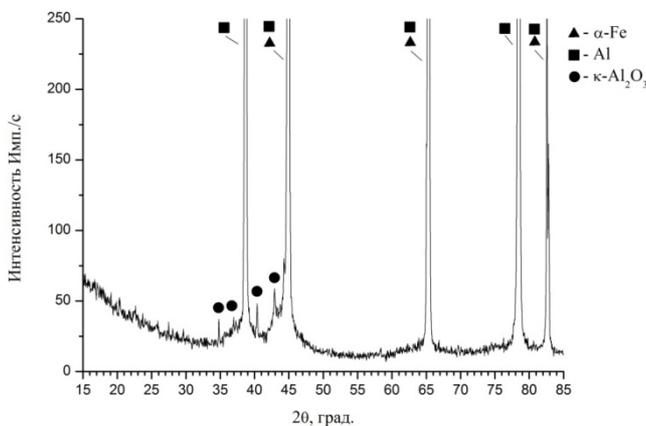


Рис. 3. Фазовый состав продуктов расплава с поверхности реза композиции «сталь Ст3 + алюминий А5М» при раскросе по технологической схеме Hi-Focus^{plus} со стороны алюминия А5М

Наличие подобного рода оксидов в расплаве способствует повышению его вязкости и затруднению в полном удалении из канала реза.

Вторая исследуемая биметаллическая композиция представляет собой соединение сваркой взрывом стали Ст3 и меди М1. Из всех представленных материалов медь имеет наименьшее значение кинематической вязкости. Коэффициент динамической вязкости расплава меди при температуре плавления 1200 °С равен 3,12 мПа·с. Учитывая плотность меди, значение ее кинематической вязкости составляет $0,35 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, что существенно ниже, чем значение кинематической вязкости стали и алюминия.

Раскрой данной биметаллической композиции проводили по технологической схеме Hi-Focus^{plus} [8].

На рис. 4, а показано поперечное сечение реза исследуемой композиции при раскросе со стороны стали Ст3, а на рис. 4, б – со стороны меди М1.

Внешний вид поверхности реза при раскросе со стороны стали Ст3 представлен на рис. 5, со стороны меди М1 – на рис. 6.

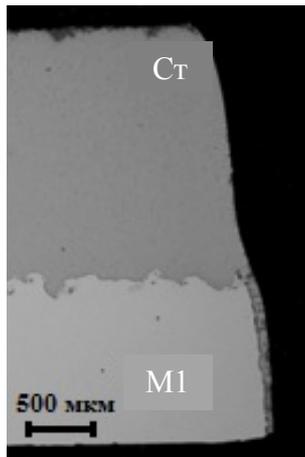
В целом геометрия реза исследуемой композиции при раскросе со стороны стали на верхнем участке (сталь) подчиняется общим закономерностям формирования канала реза при обработке углеродистых сталей методом тонкоструйной плазменной резки [3]. Это относится к показателям точности, шероховатости реза и графообразованию.

Следует отметить образование наплыва размером 0,15...0,17 мм на медном участке композиции (см. рис. 4, а). Причину образования подобного дефекта можно объяснить тем, что определенная часть расплава материала верхнего участка (стали Ст3), попадая на поверхность реза меди, вследствие высокой теплопроводности последней, резко остывает ниже температуры плавления, осаждаясь в виде расплава.

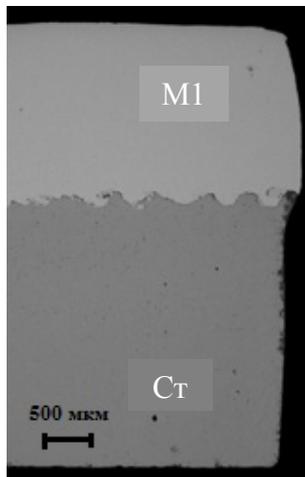
Смена лобовой стороны реза со стали на медь изменяет как геометрию реза пакета в целом, так и термодинамические условия удаления расплава из канала реза (см. рис. 4, б).

Формирование геометрии на участке меди, характерное для термических методов резки металлических материалов с высокой теплопроводностью, имеет определенную конусность реза, точность и качество которого подробно исследовано при тонкоструйной плазменной резке меди [5]. Геометрия реза на участке стали также соответствует выявленным

ранее закономерностям ее формирования при раскросе стали Ст3 [3].



а)



б)

Рис. 4. Поперечное сечение реза композиции «сталь Ст3 + медь М1» при раскросе по технологической схеме Ni-Focus^{plus} со стороны стали Ст3 (а) и со стороны меди М1 (б)

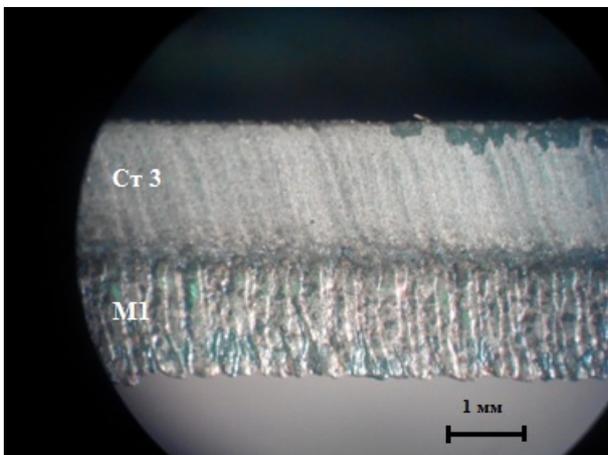


Рис. 5. Внешний вид поверхности реза композиции «сталь Ст3 + медь М1» со следами расплава стали на участке меди при раскросе со стороны стали Ст3

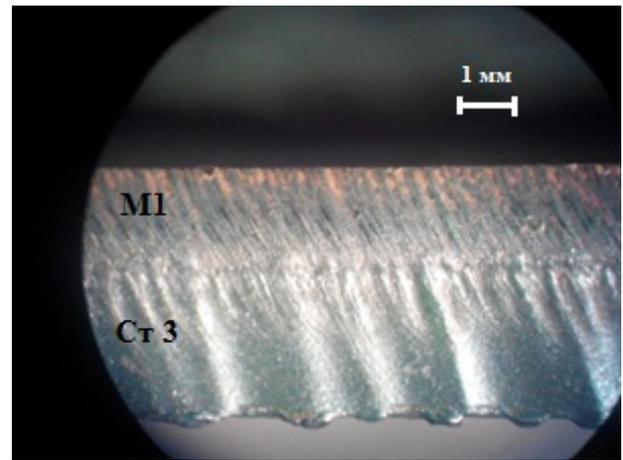


Рис. 6. Особенности формирования рельефа поверхности реза композиции «сталь Ст3 + медь М1» при раскросе со стороны меди М1

Следует отметить, что исследуемая схема тонкострунной плазменной резки данной композиции со стороны меди обеспечивает формирование поверхности реза на обоих участках без видимых следов осаждения расплава меди и стали (см. рис. 4, б). Это свидетельствует об оптимальности термодинамических условий раскроса композиции и эффективности газодинамических потоков в зоне реза, обеспечивающих полное удаление продуктов расплава из зоны реза, вследствие низкой кинематической вязкости расплава меди.

ВЫВОДЫ

1. Экспериментально показано, что качество обработки материалов, обусловленное удалением расплава из зоны реза, определяется значением кинематической вязкости их расплавов.

2. При раскросе биметаллических композиций, состоящих из разнородных металлических материалов, целесообразно выбирать лобовую сторону реза таким образом, чтобы материал с высокой кинематической вязкостью его расплава располагался в нижней части пакета.

3. При тонкострунной плазменной резке материалов с высокой кинематической вязкостью расплава целесообразно выбирать технологические схемы обработки с большими значениями давления и расхода плазмообразующего газа, тем самым увеличивая газодинамические потоки, ответственные за удаление расплава из зоны реза, что в свою очередь, повышает качество реза, снижает шероховатость обработанной поверхности и минимизирует образование грата на нижних кромках реза.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рахимьянов, Х.М., Локтионов, А.А. Анализ погрешностей формообразования при тонкоструйной плазменной резке металлических материалов // Современные проблемы в технологии машиностроения: Сб. тр. Всерос. науч.-практ. конф., посвященной 100-летию со дня рождения профессора И.И. Муханова: – Новосибирск, 2009. – С. 151–153.
2. Рахимьянов, Х.М., Локтионов, А.А. Влияние технологий тонкоструйной плазменной резки на формирование шероховатости реза // Современные проблемы машиностроения: сб. науч.тр. 7-й Междунар. науч.-техн. конфер. – Томск, 2013. – С. 349–353.
3. Рахимьянов, А.Х. Выбор технологических схем и оптимизация режимов тонкоструйной плазменной резки конструкционных сталей // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2014. - № 2 (63). – С. 46 – 55.
4. Рахимьянов, Х.М., Рахимьянов, К.Х., Рахимьянов, А.Х., Шопф, С.В., Захаров В.В. Исследование обрабатываемости стали 12Х18Н10Т методом тонкоструйной плазменной резки // Инновации в машиностроении: тр. 4-й Междунар. науч.-практ. конф., Новосибирск, 2 – 4 окт. 2013 г. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – С. 38 – 44.
5. Рахимьянов, А.Х. Тонкоструйная плазменная резка медных сплавов // Инновации в машиностроении – основа технического развития России: материалы VI Междунар. науч.-техн. конф. / под ред. А.Г. Сулова, А.М. Маркова. – Барнаул, 2014. – Ч. 2. – С. 66–70.
6. Рахимьянов, А.Х., Красильников, Б.А. Технологические особенности плазменного раскроя алюминиевых сплавов // Инновации в машиностроении – основа технического развития России: материалы VI Междунар. науч.-техн. конф./ под ред. А.Г. Сулова, А.М. Маркова. – Барнаул, 2014. – Ч. 2. – С. 71–77.
7. Рахимьянов, А.Х., Рахимьянов, Х.М., Красильников, Б.А. Технологические особенности раскроя биметаллического соединения «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т» при тонкоструйной плазменной резке // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2014. – № 3 (64). – С. 51–67.
8. Advantages of high-precision plasma cutting for processing bimetallic compositions / Kh. Rakhmyanov, A. Rakhmyanov, A. Zhuravlev // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 698. – P. 294–298.
9. High-precision plasma cutting of the steel – aluminum bimetallic composition / Kh. Rakhmyanov, A. Rakhmyanov, M. Heifetz // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 788. – P. 41–45.
10. Рахимьянов, Х.М., Рахимьянов, А.Х., Смирнов, А.Н. Особенности формирования канала реза при тонкоструйной плазменной резке биметаллических композиций, выполненных из разнородных материалов// Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2016. – № 1 (70). – С. 22–30.

REFERENCES

1. Rakhimyanov, Kh.M., Loktionov, A.A. Analysis of shaping errors at fine-jet plasma metal cutting // *Current Problems in Engineering Technique: Proceedings of All-Russian Scientific Practical Conf. Devoted to 100-th Anniversary of Prof. Mukhanov's Birthday*: – Novosibirsk, 2009. – pp. 151–153.
2. Rakhimyanov, Kh.M., Loktionov, A.A. Influence of fine-jet plasma cutting techniques upon cut roughness formation // *Current Problems in Mechanical Engineering: Proceedings of the VII-th Inter. Scientific Technical Conf.* – Tomsk, 2013. – pp. 349–353.
3. Rakhimyanov, A.Kh. Choice of technological circuits and mode optimization of fine-jet plasma cutting of structural steel // *Metal Treatment (technology, equipment, tools)*. – 2014. - № 2 (63). – pp. 46 – 55.
4. Rakhimyanov, Kh.M., Rakhimyanov, K.Kh., Rakhimyanov, A.Kh., Shopf, S.V., Zakharov V.V. Investigation of steel12H18N10T machinability by method of fine-jet plasma cutting // *Innovations in Mechanical Engineering: Proceedings of the IV-th Inter. Scientific Practical Conf. Novosibirsk, October 2 – 4, 2013.* - Novosibirsk: Publishing House of NSTU, 2013. – pp. 38 – 44.
5. Rakhimyanov, A.Kh. Fine-jet plasma cutting of copper alloys // *Innovations in Mechanical Engineering – Basis of Russia Engineering Development: Proceedings of the VI-th Inter. Scientific Practical Conf.* / under the editorship of A.G. Suslov, A.M. Markov. – Barnaul, 2014. – Part 2. – pp. 66–70.
6. Rakhimyanov, A.Kh., Krasilnikov, B.A. Technological peculiarities in plasma cutting of aluminum alloys // *Innovations in Mechanical Engineering – Basis of Russia Engineering Development: Proceedings of the VI-th Inter. Scientific Practical Conf.* / under the editorship of A.G. Suslov, A.M. Markov. – Barnaul, 2014. – Part. 2. – pp. 71–77.
7. Rakhimyanov, A.Kh., Rakhimyanov, Kh.M., Krasilnikov, B.A. Technological peculiarities in cutting of bimetallic composition of “steelSt3 + steel12H18N10T” at fine-jet plasma cutting // *Metal Treatment (technology, equipment, tools)*. – 2014. – № 3 (64). – pp. 51–67.
8. Advantages of high-precision plasma cutting for processing bimetallic compositions / Kh. Rakhmyanov, A. Rakhmyanov, A. Zhuravlev // *Applied Mechanics and Materials*. – 2015. – Vol. 698. – P. 294–298.
9. High-precision plasma cutting of the steel – aluminum bimetallic composition / Kh. Rakhmyanov, A. Rakhmyanov, M. Heifetz // *Applied Mechanics and Materials*. – 2015. – Vol. 788. – P. 41–45.
10. Rakhimyanov, Kh.M., Rakhimyanov, A.Kh., Smirnov, A.N. Peculiarities in formation of cut channel at fine-jet plasma cutting of bimetallic compositions made of different materials// *Metal Treatment (technology, equipment, tools)*. – 2016. – № 1 (70). – pp. 22–30.

Рецензент д.т.н. А.М. Марков