

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ КАНАЛА РЕЗА ПРИ ТОНКОСТРУЙНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКЕ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ ИЗ РАЗНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Х.М. РАХИМЯНОВ¹, доктор техн. наук, профессор
А.Х. РАХИМЯНОВ¹, ассистент
А.Н. СМИРНОВ², доктор техн. наук, профессор
(¹НГТУ, г. Новосибирск,
²КузГТУ, г. Кемерово)

Поступила 19 октября 2015
Рецензирование 15 января 2016
Принята к печати 15 февраля 2016

Рахимьянов А.Х. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: centerfht@mail.ru

Рассматриваются особенности формирования канала реза биметаллической композиции «сталь Ст3 + алюминий А5М» при тонкоструйной плазменной резке. Выявлено, что механизм формирования канала реза определяется как выбором технологической схемы раскроя композиции, так и назначением лобовой стороны реза. Показано, что различный характер геометрии реза на участках биметалла определяется теплофизическими свойствами материалов композиции, в первую очередь температурой его плавления. Так, при раскрое пакета со стороны низкоуглеродистой стали на участке алюминия формируется поднутрение, заполненное элементами расплава стали. Это объясняется как существенной разницей в температурах плавления стали и алюминия, так и ослаблением газодинамических потоков в канале реза, ответственных за удаление продуктов расплава. При смене лобовой стороны раскроя со стали на алюминий наблюдается осаждение продуктов расплава алюминия в канале реза, что объясняется его высокой кинематической вязкостью. Установлено образование зоны термического влияния на участке низкоуглеродистой стали размером до 300 мкм.

Ключевые слова: биметаллическая композиция, канал реза, тонкоструйная плазменная резка, температура плавления, расплав.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-1-22-30

Введение

Внедрение энерго- и ресурсосберегающих технологий на всех стадиях промышленного производства машиностроительной продукции является необходимым условием для повышения его эффективности. Последнее в значительной степени зависит от технологических решений, принятых на начальной стадии производства, поскольку достижение высоких показателей точности на этапе заготовительного производ-

ства во многом определяет дальнейшее развитие технологического процесса, в первую очередь на стадии механической обработки. Стремление к повышению эффективности заготовительного производства и определило интенсивную разработку и внедрение современных технологий листового раскроя металлических материалов – лазерной, плазменной, гидроабразивной резки [1–5].

Сравнительный анализ, представленный одним из передовых производителей оборудования термической резки – фирмой «Hypertherm»

(США), показал, что в условиях серийного производства для раскроя листовых металлических материалов (углеродистых и нержавеющей сталей, цветных металлов и сплавов) в широком диапазоне толщин (от 0,5 до 80 мм) весьма привлекательной является современная технология тонкоструйной плазменной резки [6], которую авторы статьи [7] рассматривают как альтернативу лазерной резке.

Результаты экспериментальных исследований по оценке точности [8], качества [9] при обработке различных материалов – конструкционных углеродистых [10] и нержавеющей сталей [11], а также медных и алюминиевых сплавов [12, 13] подтвердили эффективность использования данной технологии раскроя. Дальнейшие исследования, направленные на расширение технологических возможностей тонкоструйной плазменной резки, позволили выявить перспективы данной технологии в раскрое композиций, представляющих собой соединение разнородных металлических материалов [14–16]. В этих работах дана оценка точностных характеристик реза биметаллических композиций, выполненная согласно рекомендациям ISO 9013: 2002 [17], при использовании различных технологических схем тонкоструйной плазменной резки. Однако остается открытым вопрос о механизмах

формирования канала реза в биметаллических композициях, накладывающих определенные ограничения на выбор технологических параметров процесса.

Целью настоящей работы является изучение особенностей формирования канала при тонкоструйной плазменной резке биметаллической композиции «сталь Ст3 + алюминий А5М».

Материалы и методы исследования

Экспериментальные исследования проводились на технологическом комплексе тонкоструйной плазменной резки, структура и состав которого представлены в работе [10]. В качестве материалов для раскроя использовались биметаллические соединения, полученные сваркой взрывом [18–19]. Для плакирования был выбран листовой прокат стали Ст3 (ГОСТ 380-2005) [20] толщиной 3 мм, а в качестве плакирующего материала – листовой прокат алюминия А5М (ГОСТ 21631–76) [21] толщиной 3 мм. Выбор столь разнородных, в первую очередь по теплофизическим характеристикам, материалов в композиции и определяет специфику формирования канала реза при тепловом воздействии. В таблице приведены теплофизические характеристики материалов исследуемой биметаллической композиции.

Теплофизические характеристики стали Ст3 и алюминия А5М

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		
Ст3	7,80	0,1077	63	53	37	1539	277
А5М	2,70	0,2129	197	197	197	660	390

Изучение структурно-фазового состояния материала в зоне реза проводилось с использованием оптической микроскопии на микроскопе модели Axio Observer A1m при съемке камерой AxioCam MRc5. Для исследования тонкого строения материала использовался растровый электронный микроскоп модели CarlZeiss 1540 с полевой эмиссией катода.

Анализ результатов химических процессов, протекающих в канале реза при тонкоструйной плазменной резке, проводился методом рентгеновской дифрактометрии [22] на дифрактометре

модели ARL X'TRA с использованием медной рентгеновской трубки в качестве источника излучения.

Результаты и обсуждения

При использовании технологической схемы Ni-Focus^{plus} для раскроя пакета со стороны стали и с учетом строения плазменной дуги в канале реза [23] предполагалось, что максимальная теплопередача от участков плазменного столба дугового разряда и анодного пятна будет про-

исходить в верхней половине биметаллического пакета – на участке стали Ст3, температура плавления которой превышает 1500 °С (с учетом задействования механизма кислородной резки температура плавления окиси железа снижается до 1350 °С) [24]. Менее теплонапряженная часть дугового разряда (факельная) распространяется на участке алюминия с низкой температурой плавления (660 °С). Даже такое, казалось бы, благоприятное распределение теплонапряженности процесса резки не обеспечивает благоприятной формы реза (рис. 1). На верхнем участке стали геометрия реза по точности и качеству хорошая, без видимых следов осаждения элементов расплава (рис. 2).

Геометрия реза и его качество на нижнем участке биметаллической композиции имеют существенные отличия (рис. 1). Во-первых, на границе стыка металлов сформирован уступ размером ~200 мкм на сторону реза, что свидетельствует о расширении канала реза на данном участке до 0,4 мм. Во-вторых, канал реза меняет свои размеры на участке алюминия, внизу пакета отклонение составляет уже 0,8 мм на сторону. В-третьих, рез не имеет правильной геометрии, а представляет собой волнообразную кривую, не имеющую регулярности характера. В-четвертых, на рассматриваемом участке имеются остатки расплава стали переменной толщины с наличием дефектов в виде пор, пустот, трещин, отдельных фрагментов материала.

Подобный характер формирования реза данной композиции можно объяснить следующим

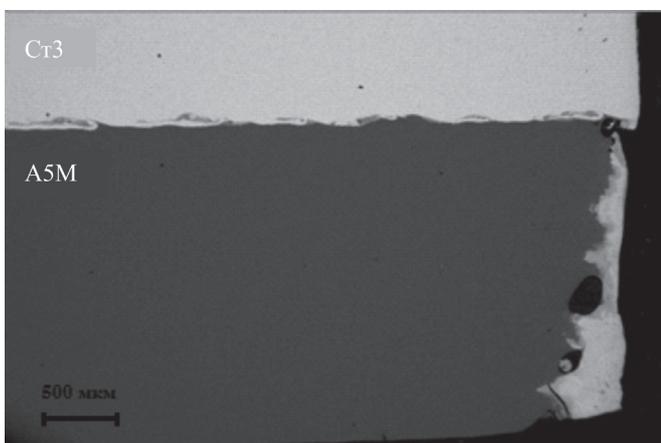


Рис. 1. Поперечное сечение реза композиции «сталь Ст3 + алюминий А5М» при раскрое по технологической схеме Hi-Focus^{plus} со стороны стали Ст3

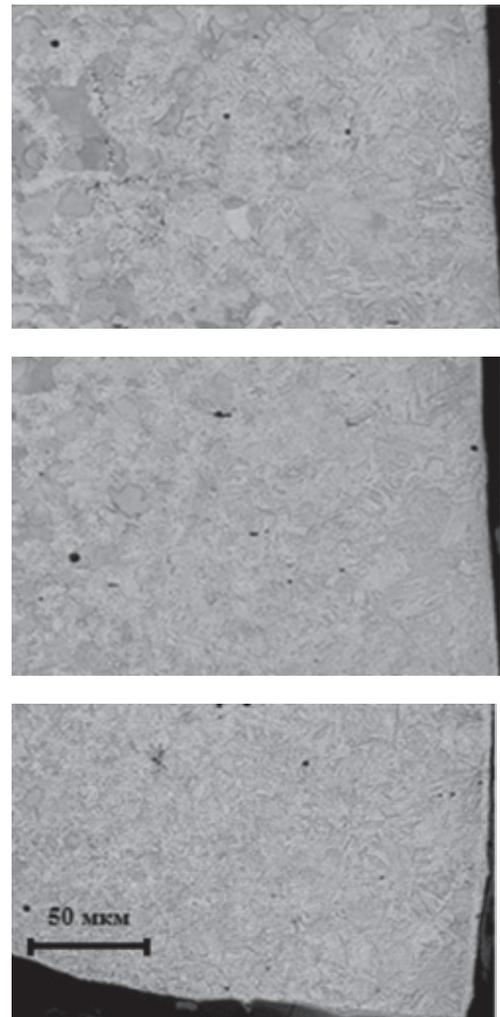


Рис. 2. Панорама реза биметаллической композиции «сталь Ст3 + алюминий А5М» на участке стали Ст3 при раскрое пакета по технологической схеме Hi-Focus^{plus} со стороны стали Ст3

образом. В силу значительной разницы в температурах плавления железа и алюминия даже с учетом меньшей теплонапряженности процесса в зоне действия факела плазменной дуги на участке алюминия расплавление последнего происходит в больших объемах, чем у стали, что и приводит к формированию разной ширины канала реза на участках составляющих биметалла с образованием уступа на их границе. Этому способствует также существенная разница в теплопроводностях стали и алюминия, что обеспечивает дополнительный приток тепла в нижнюю часть биметаллической композиции. Если бы формирование канала реза ограничивалось действием рассмотренных процессов, то на участке алюминия он был бы геометрически ровным с сужением к низу. Однако образование

уступа на границе сталь – алюминий, представляющего собой своеобразную нишу, приводит к искажению и ослаблению газодинамических потоков и способствует попаданию туда части расплава стали с верхнего участка. Медленное (относительно скорости гидродинамических потоков выноса основной массы расплава из канала реза газовыми потоками) стекание высокотемпературного расплава стали по каналу реза на участке алюминия за счет высокой теплопроводности последнего приводит к появлению жидкой фазы и расширению канала. Таким образом, жидкая ванна расплава стали является источником тепла в этот момент времени для дальнейшего расплавления алюминия. Поскольку стекание расплава не может быть равномерным на всем протяжении канала, расплавление материала по объему также неравномерно. Это приводит к формированию подобной геометрии канала реза на участке алюминиевой составляющей биметалла. Постепенное охлаждение расплава по мере стекания по каналу реза приводит к его кристаллизации и осаждению.

Характер распределения микротвердости в зоне термического влияния подтверждает представленные соображения о процессах формирования канала реза в исследуемой биметаллической композиции (рис. 3).

Изменение микротвердости на участке низкоуглеродистой стали имеет традиционный характер при поверхностных методах термического воздействия [25, 26], а именно постепенное снижение от максимума у поверхности до исходного значения на границе зоны термического влияния. При этом ширина зоны термического

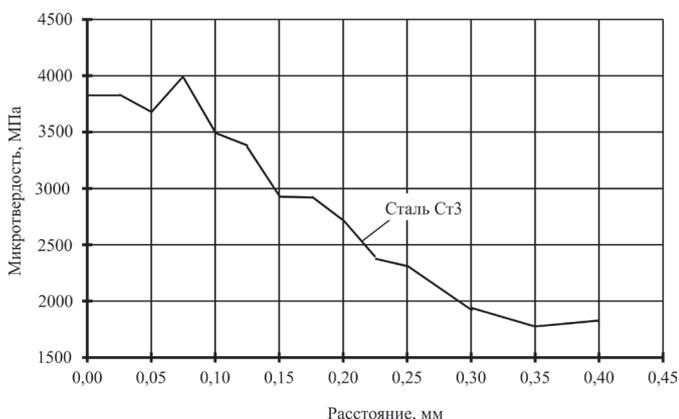


Рис. 3. Характер распределения микротвердости в зоне термического влияния при раскросе композиции «сталь Ст3 + алюминий А5М» со стороны стали Ст3

влияния достигает 300 мкм. Микротвердость на участке алюминия не претерпела изменений в результате воздействия низкотемпературной плазмы и соответствовала микротвердости исходного материала.

Смена лобовой стороны реза со стали на алюминий в рамках технологической схемы Hi-Focus^{plus} также не обеспечивает улучшения геометрии и качества реза (рис. 4). Если геометрия реза на верхнем (алюминиевом) участке биметалла, характерная для раскроса металлов с высокой теплопроводностью, сформирована действием непосредственно плазменной дуги, то на нижнем (стальном) участке в окончательном формировании канала реза участвует расплав алюминия. Если в предыдущем случае натекание расплава стали на участке алюминия было вызвано образованием ниши на пути движения расплава и ослаблением газодинамических условий в расширенном канале реза, то в данной схеме осаждение расплава алюминия главным образом обусловлено его высокой кинематической вязкостью. Характер геометрии канала на участке стали свидетельствует о том, что его окончательное формирование определяется не действием плазменной дуги, а подплавлением от стекающих по нему элементов расплава алюминия (рис. 5).

Уменьшение зоны термического влияния на участке стали по оценкам структурного состояния до 150...180 мкм свидетельствует о снижении температурного градиента в случае, когда

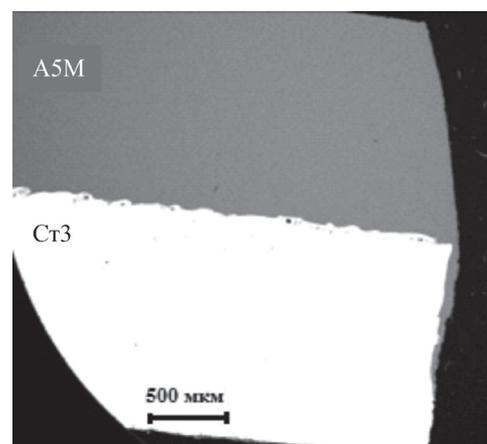


Рис. 4. Поперечное сечение реза композиции «сталь Ст3 + алюминий А5М» при раскросе пакета по технологической схеме Hi-Focus^{plus} со стороны алюминия А5М

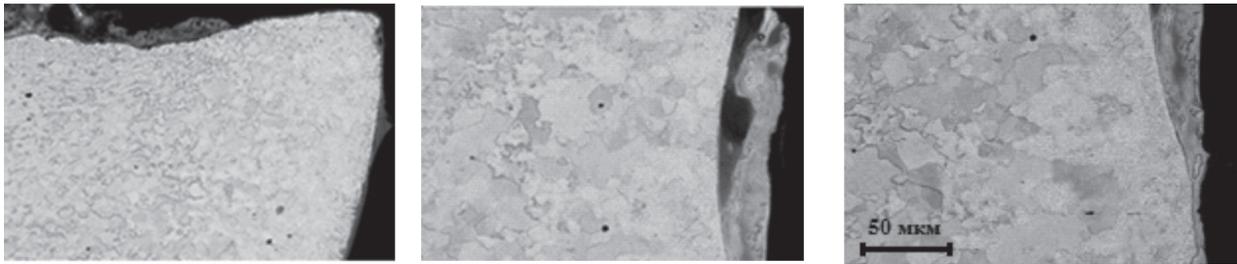


Рис. 5. Формирование канала реза на участке стали Ст3 при раскroe композиции «сталь Ст3 + алюминий А5М» по технологической схеме Hi-Focus^{plus} со стороны алюминия А5М

источником тепла является стекающий расплав по сравнению с прямым действием на обрабатываемый материал плазменной дуги.

Осажденный в канале реза расплав представляет собой продукты кристаллизации из расплава как алюминия, так и стали и оксида алюминия, что подтверждают результаты рентгенофазового анализа (рис. 6). При этом в расплаве имеются поры, трещины и отдельные частицы стали Ст3 (рис. 7).

Использование менее энергоемкой технологической схемы Hi-Focus на режимах раскroe

алюминиевых сплавов в целом не изменило в лучшую сторону картину формирования канала реза, структурного состояния при раскroe с любой стороны биметаллического пакета.

Выводы

Экспериментально установлено, что при тонкоструйной плазменной резке биметаллических композиций характер формирования канала реза определяется как выбором технологической схемы раскroe, так и назначением лобовой стороны реза, а также теплофизическими свойствами материалов композиции, в первую очередь температурой плавления и кинематической вязкостью расплава. Так, при раскroe биметаллического пакета со стороны стали на нижнем участке формируется ниша, заполненная расплавом стали, что объясняется значительной разницей в температурах плавления металлов, составляющих биметаллическую композицию, и ухудшением газодинамических потоков в канале реза. Смена лобовой стороны раскroe приводит к осаждению элементов расплава алюминия в канале реза, вызванное его высокой кинематической вязкостью.

Показано, что высокоинтенсивный характер процесса обработки приводит к образованию зоны термического влияния величиной до 300 мкм.

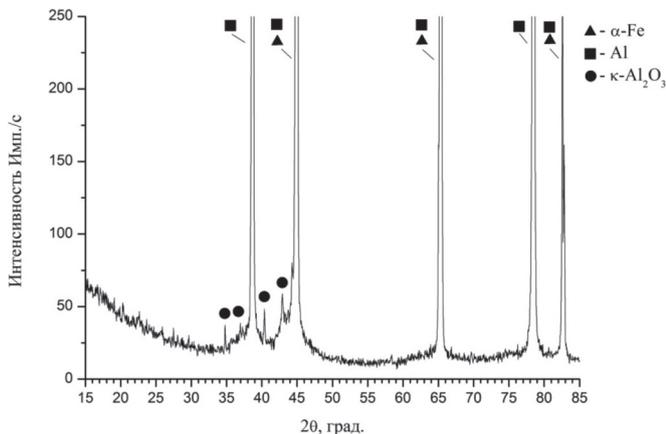


Рис. 6. Фазовый состав продуктов расплава с поверхности реза композиции «сталь Ст3 + алюминий А5М» при раскroe по технологической схеме Hi-Focus^{plus} со стороны алюминия А5М

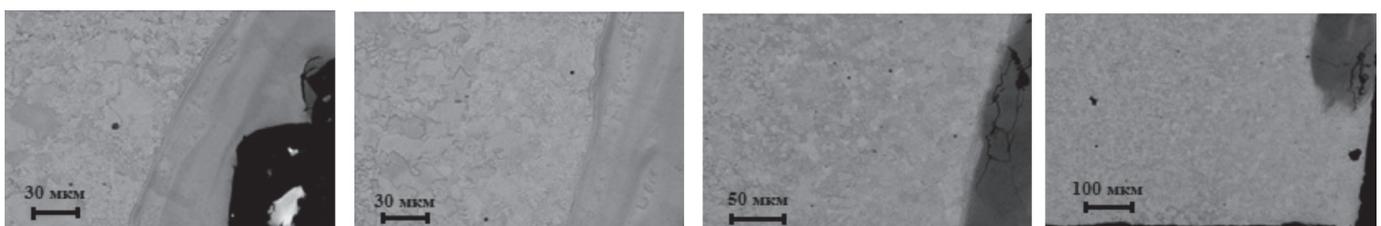


Рис. 7. Структура осажденного расплава в канале реза на участке стали Ст3 при раскroe композиции «сталь Ст3 + алюминий А5М» по технологической схеме Hi-Focus^{plus} со стороны алюминия А5М

Список литературы

1. *Забелин А.М., Оришич А.М., Чирков А.М.* Лазерные технологии машиностроения: учебное пособие / Новосибирский государственный университет. – Новосибирск: [б. и.], 2004. – 142 с.
2. *Григорьянц А.Г., Соколов А.А.* Лазерная резка металлов. – М.: Высшая школа, 1988. – 127 с. – ISBN 5-06-001252-2.
3. *Васильев К.В.* Плазменно-дуговая резка – перспективный способ термической резки // Сварочное производство. – 2002. – № 9. – С. 26–28.
4. *Шманев В.А., Шулепов А.П., Мещеряков А.В.* Струйная гидроабразивная обработка деталей ГТД. – М.: Машиностроение, 1995. – 144 с. – ISBN 5-217-01779-1.
5. *Серикова Е.В.* Гидроабразивный метод резки материалов // Строительные и дорожные машины. – 2006. – № 2. – С. 27–29.
6. *Чуеу К.Ф.* 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.
7. *Kirkpatrick I.* High definition plasma – an alternative to laser technology // Aircraft Engineering and Aerospace Technology. – 1998. – Vol. 70, iss. 3. – P. 215–217. – doi: <http://dx.doi.org/10.1108/00022669810370349>.
8. *Рахимьянов Х.М., Локтионов А.А.* Анализ погрешностей формообразования при тонкоструйной плазменной резке металлических материалов // Современные проблемы в технологии машиностроения: всероссийская научно-практическая конференция, посвященная 100-летию со дня рождения профессора Муханова И.И.: сборник трудов. – Новосибирск, 2009. – С. 151–153.
9. *Рахимьянов Х.М., Локтионов А.А.* Влияние технологий тонкоструйной плазменной резки на формирование шероховатости реза // Современные проблемы машиностроения: 7 международная научно-техническая конференция, Томск, 11–13 ноября 2013 г.: сборник научных трудов. – Томск, 2013. – С. 349–353.
10. *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.
11. Исследование обрабатываемости стали 12X18H10T методом тонкоструйной плазменной резки / Х.М. Рахимьянов, К.Х. Рахимьянов, А.Х. Рахимьянов, С.В. Шопф, В.В. Захаров // Инновации в машиностроении: труды 4 международной научно-практической конференции, Новосибирск, 2–4 октября 2013 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – С. 38–44.
12. *Рахимьянов А.Х.* Тонкоструйная плазменная резка медных сплавов // Инновации в машиностроении – основа технического развития России: материалы VI международной научно-технической конференции, Барнаул, 23–26 сентября 2014 г. / под ред. А.Г. Сусллова, А.М. Маркова. – Барнаул, 2014. – Ч. 2. – С. 66–70.
13. *Рахимьянов А.Х., Красильников Б.А.* Технологические особенности плазменного раскроя алюминиевых сплавов // Инновации в машиностроении – основа технического развития России: материалы VI международной научно-технической конференции, Барнаул, 23–26 сентября 2014 г. / под ред. А.Г. Сусллова, А.М. Маркова. – Барнаул, 2014. – Ч. 2. – С. 71–77.
14. *Рахимьянов А.Х., Рахимьянов Х.М., Красильников Б.А.* Технологические особенности раскроя биметаллического соединения «сталь Ст3 + сталь 12X18H10T» при тонкоструйной плазменной резке // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2014. – № 3 (64). – С. 51–67.
15. *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](http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.698.294).
16. *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](http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.788.41).
17. ISO 9013:2002. Резка тепловая. Классификация резов, полученных тепловым способом. Геометрические характеристики изделий и допуски на характеристики. – М.: Стандартинформ, 2002. – 25 с. – (Стандарты Международной организации по стандартизации (ИСО)).
18. *Дерибас А.А.* Физика упрочнения и сварки взрывом / отв. ред. С.С. Григорян. – 2-е изд., доп. и перераб. – Новосибирск: Наука, 1980. – 221 с.
19. *Захаренко И.Д.* Сварка металлов взрывом / АН БССР, Витебское отделение Института физики твердого тела и полупроводников. – Минск: Навука і тэхніка, 1990. – 205 с.
20. ГОСТ 380–2005. Сталь углеродистая обыкновенного качества. Марки. – М.: Стандартинформ, 2007. – 8 с.
21. ГОСТ 21631–76. Листы из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2008. – 30 с.
22. *Pecharsky V.K., Zavalij P.Y.* Fundamentals of powder diffraction and structural characterization of materials. – 1st ed. – New York: Springer US Publ., 2003. – 713 p. – ISBN 978-0-387-24147-0. – doi: [10.1007/b106242](http://dx.doi.org/10.1007/b106242).

23. Ширшов И.Г., Котиков В.Н. Плазменная резка. – Л.: Машиностроение, 1987. – 192 с.

24. Полевой Г.В., Сухинин Г.К. Газопламенная обработка металлов: учебник для среднего профессионального образования. – М.: Академия, 2005. – 336 с. – ISBN 5-7695-1604-6.

25. Головин Г.Ф., Замятин М.М. Высокочастотная термическая обработка. – Л.: Машиностроение, 1968. – 228 с.

26. Самохоцкий А.И., Парфеновская Н.Г. Технология термической обработки металлов. – М.: Машиностроение, 1976. – 311 с.

OBRAVOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 1 (70), January – March 2016, Pages 22–30

Features of cut channel formation during high-precision plasma cutting of bimetallic compositions made of promiscuous materials

Rakhimyanov Kh.M.¹, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: kharis51@mail.ru

Rakhimyanov A.Kh.¹, Assistant, e-mail: centerfht@mail.ru

Smirnov A.N.², D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: n.ababkov@gmail.com

¹Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

²Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev, 28 Vesennaya st., Kemerovo, 650000, Russian Federation

Abstract

The paper discusses the features of formation of the cut channel of bimetallic composition “steel St3 + aluminum A5M” during high-precision plasma cutting. The mechanism of formation of the cut channel is defined as a choice of technological scheme of cutting the composition and appointment of the front side of the cut are identified. It is shown that the different character of the geometry of the cut in the areas of the bimetal is defined by thermal properties of materials composition, and above all, its melting point. Thus, when cutting the package from the side of low carbon steel the undercut, filled with elements of melted steel, is formed on portion of aluminum. This is due to significant differences in melting temperatures of steel and aluminum, as well as the weakening of the gas-dynamic flows in the cut channel, responsible for the removal of the products melt. The formations of heat affected zone in the area of low carbon steel up to 300 microns width are established. The maximum value of microhardness (up to 4000 MPa) is observed at the surface, with a gradual decrease in microhardness up to 1800 MPa, which corresponds to the hardness of the starting material. If you change the front side of the cut with steel to aluminum, deposition of products of aluminum melt in the cut channel, due to its high kinematic viscosity is observed. When cutting a bimetallic composition from the side of aluminum the heat affected zone in the area of steel decreases to 150-180 microns. X-ray and metallographic analysis showed that the products of melt in the cut channel contain elements of aluminum, steel and aluminum oxide.

Keywords:

bimetallic composition, cut channel, high-precision plasma cutting, melting point, melt.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-1-22-30

References

1. Zabelin A.M., Orishich A.M., Chirkov A.M. *Lazernye tekhnologii mashinostroeniya* [Laser technology engineering]. Novosibirsk, 2004. 142 p.

2. Grigor'yants A.G., Sokolov A.A. *Lazernaya rezka metallov* [Laser cutting of metal]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1988. 127 p. ISBN 5-06-001252-2

3. Vasil'ev K.V. *Plazmenno-dugovaya rezka – perspektivnyi sposob termicheskoi rezki* [Plasma-arc cutting – a promising method of thermal cutting]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding International*, 2002, no. 9, pp. 26–28. (In Russian)

4. Shmanev V.A., Shulepov A.P., Meshcheryakov A.V. *Struinaya gidroabrazivnaya obrabotka detalei GTD* [Hydro-abrasive jet machining of GTE parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1995. 144 p. ISBN 5-217-01779-1
5. Serikova E.V. Gidroabrazivnyi metod rezki materialov [Waterjet cutting method of materials]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny – Construction and road building machinery*, 2006, no. 2, pp. 27–29.
6. Chieu K.F. *Issledovanie effektivnosti tekhnologii uzkostruinoi plazmennoi rezki metallov*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Research of efficiency of technology narrow jet plasma cutting. Author's abstract of PhD eng. sci. diss.]. St. Petersburg, 2008. 26 p.
7. Kirkpatrick I. High definition plasma – an alternative to laser technology. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 1998, vol. 70, iss. 3, pp. 215–217. doi: <http://dx.doi.org/10.1108/00022669810370349>
8. Rakhimyanov Kh.M., Loktionov A.A. [Analysis of errors in forming trickle plasma cutting metal materials]. *Sbornik trudov vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii “Sovremennye problemy v tekhnologii mashinostroeniya”, posvyashchennoi 100-letiyu so dnya rozhdeniya professora Mukhanova I.I.* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference “Modern Problems in Mechanical Engineering Technology”, dedicated to the 100th anniversary of the birth of professor Mukhanov I.I.]. Novosibirsk, 2009, pp. 151–153. (In Russian)
9. Rakhimyanov Kh.M., Loktionov A.A. [Impact of technology trickle plasma cutting on the formation of the surface roughness of the cut]. *Sbornik nauchnykh trudov 7 mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii “Sovremennye problemy mashinostroeniya”* [Proceedings of the 7th International Scientific-Technical Conference “Modern Problems of Engineering”]. Tomsk, 11–13 November 2013, pp. 349–353. (In Russian)
10. Rakhimyanov A.Kh. Vybora tekhnologicheskikh skhem i optimizatsiya rezhimov tonkostruinoi plazmennoi rezki konstruktsionnykh stalei [Selection of technological schemes and high-precision plasma cutting mode optimization for structural steels]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2014, no. 2 (63), pp. 46–55.
11. Rakhimyanov Kh.M., Rakhimyanov K.Kh., Rakhimyanov A.Kh., Shopf S.V., Zakharov V.V. [Study workability of the steel 12X18H10T trickle method for plasma cutting]. *Trudy 4 mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii “Innovatsii v mashinostroenii”* [Proceedings of the 4th International Scientific and Practical Conference “Innovations in Machine building”]. Novosibirsk, 2–4 October 2013, pp. 38–44. (In Russian)
12. Rakhimyanov A.Kh. [High-precision plasma cutting of copper alloys]. *Materialy VI mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii “Innovatsii v mashinostroenii – osnova tekhnicheskogo razvitiya Rossii”* [Proceedings of the VI International Scientific and Technical Conference “Innovations in mechanical engineering based on technological development of Russia–2014”], Barnaul, 23–26 September 2014, pt. 2, pp. 66–70. (In Russian)
13. Rakhimyanov A.Kh., Krasil'nikov B.A. [Technological features of plasma cutting aluminum alloys]. *Materialy VI mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii “Innovatsii v mashinostroenii – osnova tekhnicheskogo razvitiya Rossii”* [Proceedings of the VI International Scientific and Technical Conference “Innovations in Mechanical Engineering Based on Technological Development of Russia–2014”], Barnaul, 23–26 September 2014, pt. 2, pp. 71–77. (In Russian)
14. Rakhimyanov A.Kh., Rakhimyanov Kh.M., Krasil'nikov B.A. Tekhnologicheskie osobennosti raskroya bimetallicheskogo soedineniya “stal' St3 + stal' 12X18H10T” pri tonkostruinoi plazmennoi rezke [Technological features of the bimetallic joints “steel Ст3 + steel 12X18H10T” layout by high-precision plasma cutting]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2014, no. 3 (64), pp. 51–67.
15. Rakhimyanov Kh., Rakhimyanov 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](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.698.294)
16. Rakhimyanov Kh., Rakhimyanov 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](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.788.41)
17. ISO 9013:2002. *Thermal cutting. Classification of thermal cuts. Geometrical product specification and quality tolerances*. Moscow, Standartinform Publ., 2002. 25 p. (In Russian)
18. Deribas A.A. *Fizika uprochneniya i svarki vzryvom* [Physics of hardening and explosion welding]. 2nd ed. Novosibirsk, Nauka Publ., 1980. 221 p.
19. Zakharenko I.D. *Svarka metallov vzryvom* [Metal welding explosion]. Minsk, Navuka i tekhnika Publ., 1990. 205 p.
20. *GOST 380–2005. Stal' uglerodistaya obyknovennogo kachestva. Marki* [State Standard 380–2005. Common quality carbon steel. Grades]. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 8 p.

21. GOST 21631–76. *Listy iz alyuminiya i alyuminiyevykh splavov. Tekhnicheskie usloviya* [State Standard 21631–76. Sheets of aluminium and aluminium alloys. Specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 2008. 30 p.
22. Pecharsky V.K., Zavalij P.Y. *Fundamentals of powder diffraction and structural characterization of materials*. 1st ed. New York, Springer US Publ., 2003. 713 p. ISBN 978-0-387-24147-0. doi: 10.1007/b106242
23. Shirshov I.G., Kotikov V.N. *Plazmennaya rezka* [Plasma cutting]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1987. 192 p.
24. Polevoi G.V., Sukhinin G.K. *Gazoplamennaya obrabotka metallov* [Flame machining metals]. Moscow, Academia Publ., 2005. 336 p. ISBN 5-7695-1604-6
25. Golovin G.F., Zamyatin M.M. *Vysokochastotnaya termicheskaya obrabotka* [High-frequency heat treatment]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1968. 228 p.
26. Samokhotskii A.I., Parfenovskaya N.G. *Tekhnologiya termicheskoi obrabotki metallov* [Technology of heat treatment of metals]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. 311 p.

Article history:

Received 19 October 2015

Revised 15 January 2016

Accepted 15 February 2016