

ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОГЕОМЕТРИИ РЕЗА АЛЮМИНИЕВЫХ И МЕДНЫХ СПЛАВОВ ПРИ ТОНКОСТРУЙНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКЕ*

Х.М. РАХИМЯНОВ, доктор техн. наук, профессор
А.Х. РАХИМЯНОВ, ассистент
К.Х. РАХИМЯНОВ, канд. техн. наук, доцент
(НГТУ, г. Новосибирск)

Получена 25 мая 2015

Рецензирование 20 июня 2015

Принята к печати 17 июля 2015

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

Рассмотрены вопросы формирования микрогеометрии реза алюминиевых и медных сплавов при тонкоструйной плазменной резке, которая является перспективной технологией заготовительного производства. Экспериментальные исследования проводились на образцах из алюминия А5М и меди М1, выполненных из листового проката толщиной 3 и 2 мм соответственно. Установлено, что формирование морфологии поверхности реза алюминия определяется как процессами взаимодействия плазменного столба дуги с обрабатываемым материалом, так и осаждения части расплава в нижней части реза. Последнее объясняется недостаточной эффективностью газодинамических потоков для полного удаления продуктов расплава из канала реза вследствие высокой кинематической вязкости обрабатываемого материала. Показано, что осаждение расплава на поверхности реза ухудшает его микрогеометрию, формируя шероховатость $Ra = 12,1$ мкм. Высокая кинематическая вязкость алюминия не позволяет исключить графообразования на кромках реза.

При тонкоструйной плазменной резке меди морфология поверхности реза имеет однородный характер без следов осаждения расплава. При регулярном характере рельефа поверхности реза ее шероховатость достигает значений $Ra = 5,98$ мкм. Формирование канала реза меди не сопровождается образованием грата на его кромках.

Ключевые слова: тонкоструйная плазменная резка, алюминиевые и медные сплавы, микрогеометрия поверхности реза, грат, технологические схемы.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-3-49-57

Введение

Развитие современной промышленности невозможно без совершенствования как средств технического оснащения, так и технологических процессов на всех этапах производства, начиная от создания материалов и получения заготовок до контроля качества готовой продукции. От эффективности принятых решений на стадии заготовительного производства во многом зави-

сит ход дальнейшего развития технологического процесса. Это определяет существующую в настоящее время тенденцию в заготовительном производстве, направленную на разработку и внедрение новых технологий и оборудования, в частности, для раскрытия листовых материалов. К последним в первую очередь следует отнести таких представителей электрофизических технологий, как лазерная, тонкоструйная плазменная и гидроабразивная резки [1–10]. Анализ

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, по государственному заданию № 2014/138, проект № 257.

технологий лазерной резки [1–4] показал, что наряду с обеспечением высоких показателей качества реза, отсутствием образования окалина они предназначены для раскроя материалов незначительной толщины (до 6–8 мм) при высокой энергоемкости процесса. Кроме этого для лазерных технологий характерны значительные капитальные затраты и сложность технического обслуживания оборудования.

Плазменные методы обработки [5–9] ориентированы на раскрой листовых металлических материалов значительных толщин, но при этом не обеспечивается высокая точность и качество реза.

Струйная гидроабразивная резка [10–12] позволяет получить высокую точность и хорошее качество реза, но обладает низкой производительностью процесса обработки.

В ряду технологий термической резки весьма привлекательной как с позиций достигаемой точности и качества обработки, так и экономичности процесса является тонкоструйная плазменная резка [13] как альтернатива лазерному раскрою металлических материалов [14]. Данная технология является модификацией плазменных методов резки.

Перспектива использования тонкоструйной плазменной резки в заготовительном производстве для раскроя листовых материалов показана в работах [15, 16].

Изучение эффективности определенного метода термической резки, к которой относятся как лазерная, так и плазменная технологии, предполагает количественную оценку таких показателей точности и качества обработки, как отклонение реза от перпендикулярности, микрогеометрия его поверхности и зона термического влияния (ISO 9013: 2002) [17].

Исследованию точностных показателей раскроя с позиций формирования реза при тонкоструйной плазменной резке конструкционных сталей посвящены работы [18–20], в которых показана взаимосвязь режимных параметров обработки с геометрической точностью реза и формированием его кромок. В работе [21] представлены механизмы формирования погрешностей при обработке криволинейных контуров и определены пути их снижения за счет назначения компенсационного припуска в зоне «захода – выхода» плазменной дуги на обрабатываемый

материал и выбора правильного направления обхода при обработке внутренних и наружных контуров. Вопросам математического моделирования процесса тонкоструйной плазменной резки при формообразовании криволинейных контуров посвящены исследования [22]. Авторами представлены расчеты величины компенсационного припуска при обработке сложнопрофильных контуров с учетом перераспределения тепловых потоков при тонкоструйной плазменной резке, моделированию которых посвящена работа [23].

Результаты представленных выше исследований посвящены в основном вопросам формирования точности при обработке углеродистых сталей, которые являются наиболее распространенными конструкционными материалами. В то же время представляет интерес вопрос расширения технологических возможностей тонкоструйной плазменной резки для обработки цветных металлов и сплавов. Так, в работах [24, 25] получены результаты по выявлению технологических особенностей раскроя алюминиевых и медных сплавов. Авторами отмечается образование значительной (до 9–12°) конусности реза, обусловленной высокой теплопроводностью данного класса материалов. Кроме этого выявлено влияние вязкости расплавов алюминия и меди на процесс графообразования на нижних кромках реза.

Как отмечалось, кроме показателей точности к контролируемому параметру при термических методах резки относится шероховатость поверхности реза. Целью настоящей работы является исследование формирования морфологии поверхности реза алюминиевых и медных сплавов при тонкоструйной плазменной резке.

Материалы и методы исследования

В качестве материалов для исследований использовался алюминий марки А5М ГОСТ 21631–76 и медь марки М1 ГОСТ 495–92 в виде листового проката толщиной 3 и 2 мм, соответственно. Теплофизические свойства материалов, определяющие специфику формирования канала реза при тонкоструйной плазменной резке, приведены в таблице.

Экспериментальные исследования проводили на технологическом комплексе тонкоструй-

Теплофизические свойства 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		
A5M	2,70	0,2129	197	197	197	660	390
M1	9,00	0,0913	330	321	309	1083	213

ной плазменной резки, состав и работа которого подробно описаны в работе [26].

В качестве технологических схем раскроя алюминиевого сплава использовалась технологическая схема Hi-Focus с токовым режимом $I = 35$ А при скорости обработки $V = 1,2$ м/мин. В качестве плазмообразующего (режущего) газа применялся воздух при давлении 5 бар и расходе 30 условных единиц шкалы прибора установки Hi-Focus 130i, а завихряющего – азотоводородная смесь в соотношении 95/5 % при давлении 6 бар и расходе 75 условных единиц.

Для изучения особенностей раскроя медного сплава применялась технологическая схема Hi-Focus, предназначенная для резки углеродистых сталей с токовым режимом $I = 35$ А при скорости обработки $V = 1,5$ м/мин. Плазмообразующим (режущим) газом являлся кислород при давлении 5 бар и расходе 25 условных единиц, а завихряющим – смесь кислорода и азота при давлении 5 бар и расходе 20 условных единиц.

Для оценки морфологии поверхности использован измерительный микроскоп модели Nikon MM-400, изучение трехмерного изображения топографии поверхности реза проводили на комплексе ZYGO New View 7300, а профилографирование микрогеометрии – на профилографе-профилометре модели 252 с цифровой индикацией результатов измерения.

Результаты и обсуждения

Анализ поверхности реза алюминия (рис. 1) свидетельствует о неоднородности ее морфологии и наличии определенной доли грата на нижней кромке.

В работе [24] представлены результаты, подтверждающие зависимость гратообразования от скорости обработки. Увеличение количества грата наблюдается при снижении скорости реза. Исключить гратообразование при раскрое алюминия не представляется возможным даже при

обработке на максимально допустимых скоростях обработки (рис. 1). Образование грата объясняется действием нескольких факторов. Во-первых, гратообразование при термических методах раскроя во многом определяется эффективностью удаления газодинамическими потоками продуктов расплава из канала реза. В основном это зависит от рационального сочетания таких параметров плазмообразующего и завихряющего газов, как давление и расход. Их значения соответствуют выбранным технологическим схемам раскроя определенного класса материала. Во-вторых, эффективность истечения продуктов расплава из зоны реза определяется его вязкостью. Алюминий обладает высоким значением кинематической вязкости, которое составляет $1,1 \cdot 10^{-6}$ м²/с, что обусловлено низкой плотностью материала (см. таблицу).

Третьей вероятной причиной, и, возможно, определяющей в повышенном гратообразовании при раскрое алюминиевых сплавов, является образование тугоплавких оксидов алюминия при взаимодействии его расплава с растворенным кислородом воздуха, используемого в данной технологической схеме в качестве плазмообразующего газа. Появление подобного рода

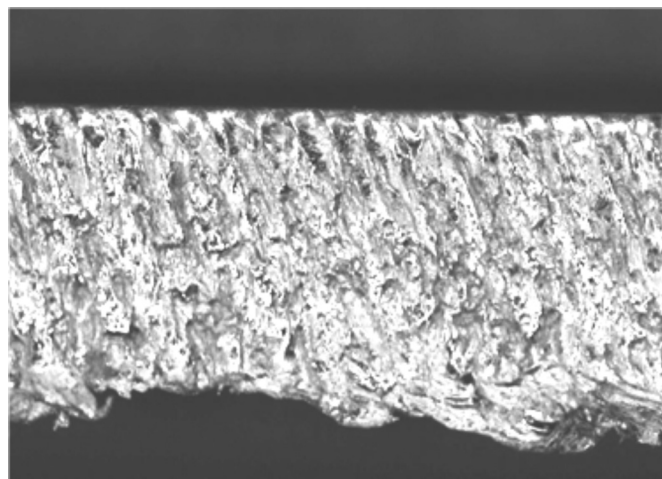


Рис. 1. Морфология поверхности реза алюминия А5М

оксидов в расплаве способствует повышению его вязкости и затруднению в полном удалении продуктов обработки из канала реза.

Анализ морфологии поверхности реза (см. рис. 1) позволил выявить наличие двух зон. Если в верхней половине реза четко просматриваются характерные для термических методов резки следы в виде бороздок от взаимодействия столба плазменной дуги с обрабатываемым материалом, то в нижней части реза морфология его поверхности представляется как результат осаждения стекающей части продуктов расплава.

Неблагоприятные условия истечения продуктов расплава алюминия из канала реза определяет невысокое качество его поверхности, о чем свидетельствуют значения шероховатости ($Ra = 12,1$ мкм) и характер микрогеометрии, представленный на профилограмме (рис. 2).

Изучение морфологии поверхности раскроя медных сплавов (рис. 3) показало хорошее качество реза без следов осаждения расплава на его поверхности. Это объясняется низким значением кинематической вязкости расплава ($0,35 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$) и достаточными газодинамическими потоками

для его удаления из канала реза. Последнее определяет практическое отсутствие грат на нижней кромке реза во всем технологически значимом диапазоне скоростей обработки (рис. 3).

Сравнение поверхностей реза алюминия (см. рис. 1) и меди (рис. 3) указывает на различие их морфологий. Так, поверхность реза меди можно считать классической для термических методов разделительной резки, представляющей собой чередование следов взаимодействия плазменной дуги с обрабатываемым материалом по всей толщине реза.

Визуальное различие в характере рельефа поверхностей реза алюминия и меди подтверждается результатами профилографирования (рис. 2 и 4).

Если профилограмма поверхности реза меди (рис. 4) и ее топограмма (рис. 5) отображают ее рельеф в виде чередующихся бороздок со средней шероховатостью $Ra = 5,98$ мкм, то профилограмма поверхности реза алюминия (рис. 2) описывает микрогеометрию осажденного его расплава.

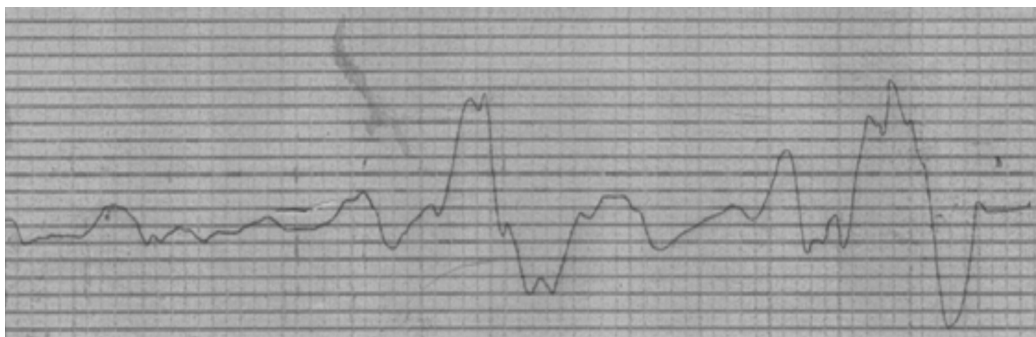


Рис. 2. Профилограмма поверхности реза алюминия А5М:
В.У. = 500; Г.У. = 50

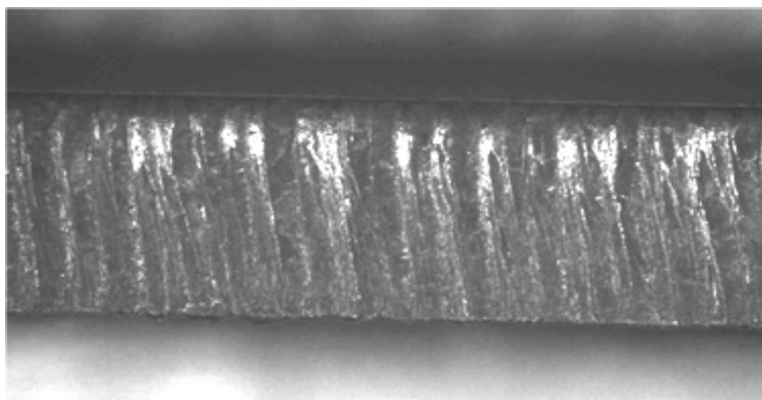


Рис. 3. Морфология поверхности реза меди М1

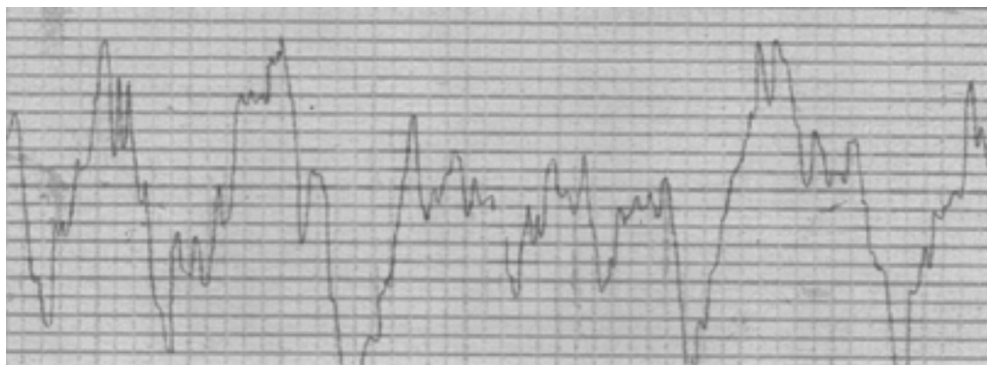


Рис. 4. Профилограмма поверхности реза меди M1:

В.У. = 2000; Г.У. = 50

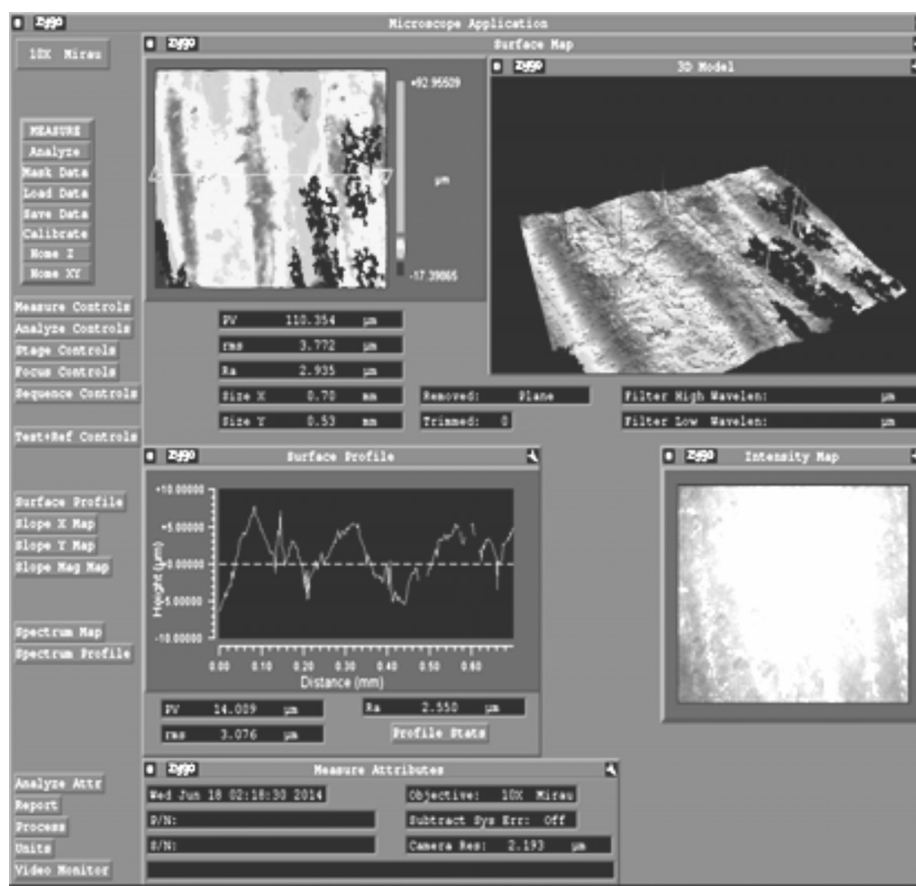


Рис. 5. Топография поверхности реза меди M1

Выводы

1. Выявлены особенности формирования морфологии поверхности реза при тонкоструйной плазменной резке алюминиевых и медных сплавов. Экспериментально доказано, что высокое значение кинематической вязкости алюминия приводит к осаждению элементов расплава в нижней части поверхности реза. Недостаточная эффективность газодинамических потоков,

ответственных за удаление продуктов расплава из канала реза, приводит к образованию грата на нижней кромке реза алюминиевых сплавов. Осаждение расплава на поверхности реза приводит к ухудшению его микрогеометрии.

2. Низкое значение кинематической вязкости расплава меди обеспечивает однородный рельеф поверхности реза, отсутствие грата на кромках и меньшее по сравнению с алюминием значение шероховатости.

Список литературы

1. Григорьянц А.Г., Соколов А.А. Лазерная резка металлов. – М.: Высшая школа, 1988. – 127 с. – ISBN 5-06-001252-2.
2. Забелин А.М., Оришич А.М., Чирков А.М. Лазерные технологии машиностроения: учебное пособие / Новосибирский государственный университет. – Новосибирск: [б. и.], 2004. – 142 с.
3. Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.
4. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюрлов А.И. Технологические процессы лазерной обработки: учебное пособие для вузов / под ред. А.Г. Григорьянца. – 2-е изд., стер. – М.: Изд-во НГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 664 с. – ISBN 5-7038-2701-9.
5. Полевой Г.В., Сухинин Г.К. Газопламенная обработка металлов: учебник для среднего профессионального образования. – М.: Академия, 2005. – 336 с. – ISBN 5-7695-1604-6.
6. Быховский Д.Г. Плазменная резка. – Л.: Машиностроение, 1972. – 167 с.
7. Васильев К.В. Плазменно-дуговая резка – перспективный способ термической резки // Сварочное производство. – 2002. – № 9. – С. 26–28.
8. Васильев К.В. Воздушно-плазменная резка. – М.: Машиностроение, 1976. – 482 с.
9. Васильев К.В. Современные задачи и перспективы развития плазменно-дуговой резки // Материалы международной специализированной выставки-конгресса «Электротехнологии XXI века» (ЭЛТЕХ–2001). – СПб., 2001. – С. 27–29.
10. Шманев В.А., Шулепов А.П., Мещеряков А.В. Струйная гидроабразивная обработка деталей ГТД. – М.: Машиностроение, 1995. – 144 с. – ISBN 5-217-01779-1.
11. Серикова Е.В. Гидроабразивный метод резки материалов // Строительные и дорожные машины. – 2006. – № 2. – С. 27–29.
12. Моргунов Ю.А., Федотов А.А., Швычков Д.В. Применение гидроабразивной резки при обработке сложнопрофильных поверхностей деталей // Применение гидроабразивной резки при обработке сложнопрофильных поверхностей деталей: материалы 65 Международной научно-технической конференции Ассоциации автомобильных инженеров (ААИ) «Приоритеты развития отечественного автотракторостроения и подготовки инженерных и научных кадров» Международного научного симпозиума «Автотракторостроение–2009». – М., 2009. – Т. 7. – С. 170–173.
13. Чиеу 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.
14. 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>.
15. Локтионов А.А., Захаров В.В. Тонкоструйная плазменная резка как эффективная технология в заготовительном производстве // Наука. Технологии. Инновации: материалы Всероссийской научной конференции молодых ученых, 2–4 декабря 2011 г.: в 6 ч. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – Ч. 2. – С. 29–30.
16. Рахимьянов Х.М., Локтионов А.А. Повышение эффективности листового раскроя в заготовительном производстве // Ползуновский альманах. – 2012. – № 1. – С. 158–159.
17. ISO 9013: 2002. Резка тепловая. Классификация резов, полученных тепловым способом. Геометрические характеристики изделий и допуски на характеристики. – М.: Стандартиформ, 2002. – 25 с. – (Стандарты Международной организации по стандартизации (ИСО)).
18. Локтионов А.А. Оценка качества реза листовых материалов при тонкоструйной плазменной резке // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2013. – № 4 (61). – С. 86–91.
19. Рахимьянов Х.М., Локтионов А.А., Никитин Ю.В. Оценка геометрической точности реза листовых материалов при различных технологиях тонкоструйной плазменной резки // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2013. – № 3 (60). – С. 25–30.
20. Рахимьянов Х.М., Локтионов А.А. Точность формообразования при тонкоструйной плазменной резке металлических материалов и пути ее повышения // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2009. – № 4 (45). – С. 31–32.
21. 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.
22. Моделирование процессов тонкоструйной плазменной резки для обеспечения точности формирования криволинейных контуров / Х.М. Рахимьянов, А.И. Журавлев, А.А. Локтионов, А.Х. Рахимьянов // Научный вестник НГТУ. – 2009. – № 4 (37). – С. 123–134.
23. Рахимьянов Х.М., Рахимьянов А.Х., Лукин С.В. Моделирование тепловых процессов тонкоструйной

плазменной резки // Инновации в машиностроении: труды 2 Международной научно-практической конференции, Кемерово, 6–8 октября 2011 г. – Кемерово, 2011. – С. 161–165.

24. *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, 23–26 сентября 2014 года / под ред. А.Г. Суслова, А.М. Маркова. – Барнаул, 2014. – Ч. 2. – С. 71–77.

25. *Рахимьянов А.Х.* Тонкоструйная плазменная резка медных сплавов // Инновации в машиностроении – основа технического развития России: материалы VI Международной научно-технической конференции / под ред. А.Г. Суслова, А.М. Маркова. – Барнаул, 2014. – Ч. 2. – С. 66–70.

26. *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.

OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 3(68), July – September 2015, Pages 49–57

Microgeometry formation of the cut during high-precision plasma cutting of aluminum and copper alloys

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

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

Rakhimyanov K.Kh., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: backtof79@mail.ru

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

Abstract

The problems of the cut microgeometry formation during aluminum and copper alloys high-precision plasma cutting, which is a promising technology for blank production, are considered. Experimental studies were conducted on samples of aluminum A5M and copper M1 made of a sheet metal with a thickness of 3 mm and 2 mm, respectively. As technological scheme for cutting aluminum alloy a Hi-Focus mode with current $I = 35$ A at the processing speed $V = 1,2$ m / min is used. To study the characteristics of cutting copper alloy the Hi-Focus technological scheme, designed for cutting carbon steels, mode with current $I = 35$ A at a processing speed $V = 1,5$ m/min. The formation of the surface morphology of the aluminum cutting process is defined as the interaction of the plasma arc column with the material being treated, and the deposition portion of the melt at the bottom of the cut. This is explained by a lack of efficiency of gasdynamic flows to completely remove the product of melt from the channel the cut due to the high kinematic viscosity of the material being processed. It is shown that the deposition of the melt on the cut surface deteriorates the microgeometry forming roughness $Ra = 12,1$ microns. High kinematic viscosity of aluminum does not exclude burr formation on the edges of the cut. When high-precision plasma cutting copper surface morphology of the cut is uniform in character without any traces of deposition of melt. With regular character of the surface topography of cut it reaches its roughness values $Ra = 5,98$ microns. Formation of the channel cut copper is not accompanied by the formation of burr at its edges.

Keywords:

high-precision plasma cutting, aluminum and copper alloys, cut surface microgeometry, burr, technological schemes.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-3-49-57

References

1. 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

2. Zabelin A.M., Orishich A.M., Chirkov A.M. *Lazernye tekhnologii mashinostroeniya* [Laser technology engineering]. Novosibirsk, 2004. 142 p.
3. Grigor'yants A.G. *Osnovy lazernoi obrabotki materialov* [Basics of laser material processing]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 304 p.
4. Grigor'yants A.G., Shiganov I.N., Misyurov A.I. *Tekhnologicheskie protsessy lazernoi obrabotki* [Technological processes of laser machining]. 2nd ed. Moscow, BMSTU Publ., 2008. 664 p. ISBN 5-7038-2701-9
5. Polevoi G.V., Sukhinin G.K. *Gazoplamennaya obrabotka metallov* [Flame machining metals]. Moscow, Academia Publ., 2005. 336 p. ISBN 5-7695-1604-6
6. Bykhovskii D.G. *Plazmennaya rezka* [Plasma cutting]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1972. 167 p.
7. 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)
8. Vasil'ev K.V. *Vozdushno-plazmennaya rezka* [Air-plasma cutting]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. 482 p.
9. Vasil'ev K.V. [Modern problems and prospects of development of plasma-arc cutting]. *Materialy mezhdunarodnoi spetsializirovannoi vystavki-kongressa «Elektrotekhnologii XXI veka» (ELTEKh–2001)* [Proceedings of the International Specialized Exhibition-Congress “Electrotechnologies XXI Century” (ELTECH–2001)]. Saint Petersburg, 2001, pp. 27–29.
10. 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
11. 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.
12. Morgunov Yu.A., Fedotov A.A., Shvychkov D.V. [The use of waterjet cutting in the processing of complex contoured surface parts]. *Materialy 65 Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii Assotsiatsii avtomobil'nykh inzhenerov (AAI) “Prioritety razvitiya otechestvennogo avtotraktorostroeniya i podgotovki inzhenernykh i nauchnykh kadrov” Mezhdunarodnogo nauchnogo simpoziuma “Avtotraktorostroenie – 2009”* [Proceedings of the 65th International Scientific Conference of the Association of Automobile Engineers (AAE) “National development priorities of automotive building and training of engineers and scientists” International Scientific Symposium “Automotive Building–2009”]. Moscow, 2009, vol. 7, pp. 170–173.
13. 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.]. Saint Petersburg, 2008. 26 p.
14. 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>
15. Loktionov A.A., Zakharov V.V. [High-precision plasma arc cutting is represented]. *Trudy 2 mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii Nauka. Tekhnologii. Innovatsii. Materialy Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii molodykh uchenykh*, 2–4 dekabria 2011 g. V 6 ch. [Plasma Cutting as an Effective Technology in the Blank Production. Proceedings of All-Russian Scientific Conference of Young Scientists “Science. Technologies. Innovations”, 2–4 December 2011. In 6 pt.]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2011, pt. 2, pp. 29–30. (In Russian)
16. Rakhimyanov Kh.M., Loktionov A.A. Povyshenie effektivnosti listovogo raskroya v zagotovitel'nom proizvodstve [Increased efficiency in cutting sheet blank production]. *Polzunovskii al'manakh – Polzunov Almanac*, 2012, no. 1, pp. 158–159.
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. Loktionov A.A. Otsenka kachestva reza listovykh materialov pri tonkostruinoi plazmennoi rezke [Assessment a cut of quality of sheet materials in the conditions of high-precision plasma cutting]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2013, no. 4 (61), pp. 86–91.
19. Rakhimyanov Kh.M., Loktionov A.A., Nikitin Yu.V. Otsenka geometricheskoi tochnosti reza listovykh materialov pri razlichnykh tekhnologiyakh tonkostruinoi plazmennoi rezki [Evaluation of geometric precision cut of sheet materials with different high-precision plasma cutting]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2013, no. 3 (60), pp. 25–30.
20. Rakhimyanov Kh.M., Loktionov A.A. Tochnost' formoobrazovaniya pri tonkostruinoi plazmennoi rezke metallicheskich materialov i puti ee povysheniya [Shaping accuracy at high-precision plasma arc cutting metal and the way of its increase]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2009, no. 4 (45), pp. 31–32.

21. Rakhimianov 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 mashinostroeniia", posvyashchennoi 100-letiiu so dnia rozhdeniia 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)

22. Rakhimianov Kh.M., Zhuravlev A.I., Loktionov A.A., Rakhimianov A.Kh. Modelirovanie protsessov tonkostruinoi plazmennoi rezki dlia obespecheniia tochnosti formirovaniia krivolineinykh konturov [High-precision plasma arc cutting modeling for shaping accuracy of cam contours assurance]. *Nauchnyi vestnik NGTU – Science Bulletin of NSTU*, 2009, no. 4 (37), pp. 123–134.

23. Rakhimyanov Kh.M., Rakhimyanov A.Kh., Lunin S.V. [Mathematical modeling of high-precision plasma arc cutting is represented]. *Trudy 2 mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Innovatsii v mashinostroeni"* [Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference "Innovations in Mechanical Engineering"], Kemerovo, 6–8 October 2011, pp. 161–165. (In Russian)

24. Rakhimyanov A.Kh., Krasil'nikov B.A. [Technological features of plasma cutting aluminum alloys]. *Materialy VI Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Innovatsii v mashinostroeni – osnova tekhnicheskogo razvitiya Rossii 2014"* [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)

25. Rakhimyanov A.Kh. [High-precision plasma cutting of copper alloys]. *Materialy VI Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Innovatsii v mashinostroeni – osnova tekhnicheskogo razvitiya Rossii 2014"* [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)

26. Rakhimyanov A.Kh. Vybor 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.

Funding

The work was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (The public contract no. 2014/138, project no. 257).

Article history:

Received 25 May 2015

Revised 20 June 2015

Accepted 17 July 2015