



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Отработка методики плазменной резки меди марки М1, алюминиевого сплава Д16Т и титанового сплава ОТ4-1 с использованием плазмотрона с обратной полярностью

Валерий Рубцов^{a, *}, Александр Панфилов^b, Евгений Княжев^c, Александра Николаева^d,
 Андрей Черемнов^e, Анастасия Гусарова^f, Владимир Белобородов^g,
 Андрей Чумаевский^h, Алексей Ивановⁱ

Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, пр. Академический 2/4, г. Томск, 634055, Россия

^a  <https://orcid.org/0000-0003-0348-1869>,  rvy@ispms.tsc.ru, ^b  <https://orcid.org/0000-0001-8648-0743>,  alexpl@ispms.ru,
^c  <https://orcid.org/0000-0002-1984-9720>,  clothoid@ispms.tsc.ru, ^d  <https://orcid.org/0000-0001-8708-8540>,  nikolaeva@ispms.tsc.ru,
^e  <https://orcid.org/0000-0003-2225-8232>,  amc@ispms.tsc.ru, ^f  <https://orcid.org/0000-0002-4208-7584>,  gusarova@ispms.ru,
^g  <https://orcid.org/0000-0003-4609-1617>,  vabel@ispms.tsc.ru, ^h  <https://orcid.org/0000-0002-1983-4385>,  tch7av@gmail.com,
ⁱ  <https://orcid.org/0000-0001-8959-8499>,  ivan@ispms.tsc.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.791.14

История статьи:

Поступила: 21 сентября 2022
 Рецензирование: 04 октября 2022
 Принята к печати: 03 ноября 2022
 Доступно онлайн: 15 декабря 2022

Ключевые слова:

Плазменная резка
 Титановый сплав ОТ4-1
 Макроструктура
 Медь марки М1
 Алюминиевый сплав Д16Т
 Зона термического влияния
 Изменение механических свойств материала
 Нарушение макрогеометрии реза

Финансирование:

Результаты получены при выполнении комплексного проекта «Создание производства высокотехнологичного оборудования адаптивной высокоточной плазменной резки цветных металлов больших толщин для металлургической, авиакосмической и транспортной отраслей РФ» (соглашение о предоставлении субсидии от 06.04.2022 № 075-11-2022-012), реализуемого ИФПМ СО РАН при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках постановления Правительства РФ от 09.04.2010 № 218.

Благодарности:

Исследования частично выполнены на оборудовании ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов» (соглашение с Минобрнаукой № 13.ЦКП.21.0034).

Для цитирования: Отработка методики плазменной резки меди марки М1, алюминиевого сплава Д16Т и титанового сплава ОТ4-1 с использованием плазмотрона с обратной полярностью / В.Е. Рубцов, А.О. Панфилов, Е.О. Княжев, А.В. Николаева, А.М. Черемнов, А.В. Гусарова, В.А. Белобородов, А.В. Чумаевский, А.Н. Иванов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2022. – Т. 24, № 4. – С. 33–52. – DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.4-33-52.

*Адрес для переписки

Рубцов Валерий Евгеньевич, в.н.с.
 Институт физики прочности и материаловедения
 Сибирского отделения Российской академии наук,
 пр. Академический 2/4,
 634055, г. Томск, Россия
 Тел.: 8 (382) 228–68–63, e-mail: rvy@ispms.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Важным направлением исследований в области плазменной резки металлов является получение поверхности реза металла, характеризующейся минимальными шероховатостью и геометрическими отклонениями. Немаловажным также является минимизация изменений структуры металла под поверхностью реза, вызванных температурным воздействием плазменной струи, в том числе образование окалины. Решением задачи получения качественного реза является оптимизация параметров процесса резки. Среди основных параметров, определяющих качество реза, рассматриваются ток и напряжение плазменной дуги, высота резки, скорость резки. Однако процессам плазменной резки металлов толщин свыше 20 мм уделено недостаточное внимание, что связано с ограничениями, обусловленными условиями работы плазмотронов на токах прямой полярности. Исходя из этого для резки больших толщин перспективным представляется использование плазмотрона, работающего на токах обратной полярности. **Целью работы** является отработка методики плазменной резки листового проката меди, титанового и алюминиевого сплава толщиной до 40 мм с использованием плазмотрона, работающего на токах обратной полярности. **Результаты и обсуждение.** Исследования показывают, что для резки сплава Д16Т и титанового сплава ОТ4-1 можно в широком диапазоне регулировать скорость резки, в то время как для проката меди М1 и сплава Д16Т толщиной 40 мм диапазон регулирования скорости резки достаточно узок. Вместе с тем для сплава Д16Т по причине избыточного выпадения легирующих элементов из твердого раствора в зоне термического влияния отмечалось падение микротвердости, для сплава ОТ4-1 характерным являлся рост микротвердости, обусловленный закалкой материала. Изменение параметров режима резки позволяет получать более однородную макрогеометрию поверхности реза, меньшую глубину зоны переплава материала и зоны термического влияния и меньшие изменения механических свойств материала в зоне реза. Для сплава ОТ4-1 практически все использованные режимы резки являлись близкими к оптимальным. Для сплава Д16Т и меди марки М1 определены режимы, обеспечивающие в рассматриваемом диапазоне параметров наилучшее качество реза. По результатам работы можно сделать вывод о том, что плазменная резка на токах обратной полярности является эффективной для резки проката больших толщин, однако методика требует дальнейшей отработки с целью повышения качества получаемого реза.

Введение

Плазменная резка металлов является неотъемлемой частью производственных процессов различных отраслей машиностроения. Хотя по качеству реза плазменная резка может уступать,

к примеру, гидроабразивной или лазерной резке [1], однако ее преимуществом является оптимальное сочетание технологических возможностей, простоты аппаратного оформления и производительности, в том числе при резке металла толщиной свыше 100 мм [2].

На сегодняшний день проводится ряд исследований в области плазменной резки металлов. Важным направлением исследований является получение поверхности реза металла, характеризующейся минимальными шероховатостью и геометрическими отклонениями [3–6]. Немаловажным также является минимизация изменений структуры металла под поверхностью реза, вызванных температурным воздействием плазменной струи, в том числе образование окалины [7–10]. Эти направления формируют основную задачу исследований: получение качественного реза, поскольку геометрические и структурные изменения материала обычно устраняются дальнейшей обработкой, минимизация припусков под которую определяет эффективность процесса плазменной резки.

Для решения этой задачи исследователями предлагается ряд методов, связанных как с изменением аппаратной реализации процесса резки, так и с оптимизацией его параметров [11–14]. Методы оптимизации параметров режима подразумевают под собой применение различных методов математического моделирования, устанавливающих связь между геометрическими и структурными параметрами материала в области реза и рядом параметров режима процесса резки. Среди основных параметров, определяющих качество реза, рассматриваются ток и напряжение плазменной дуги, высота резки, скорость резки [15–17].

Однако все исследования ведутся преимущественно с рассмотрением разрезаемых металлов толщиной до 20 мм, резке же металлов больших толщин уделено недостаточное внимание. По мнению авторов, это связано прежде всего с ограничениями, связанными с условиями работы режущих плазматронов. Наиболее широко применяемые плазматроны с термохимическими катодами и работающие на прямой полярности тока имеют ограничения по мощности и числу включений, что связано с температурным режимом работы, а также износом катодных вставок из относительно дорогих и дефицитных

металлов [18–20]. Для резки металлов больших толщин перспективным представляется способ резки на токах обратной полярности, при котором опорное пятно режущей дуги значительно углубляется в полость реза, а распределение теплового потока, поступающего во фронтальную кромку реза, по высоте последней более равномерное. Благодаря этому становится возможной резка металлов больших толщин, достигается лучшее качество реза по скосу кромок, меньшая ширина полости реза [21, 22].

Исходя из вышесказанного основная цель настоящей работы заключается в отработке методики плазменной резки листового проката меди, титанового и алюминиевого сплава толщиной до 40 мм с использованием плазматрона, работающего на токах обратной полярности. Дополнительной задачей является установление влияния толщины листового проката и нестандартного расположения пластин на строение кромки реза.

Методика исследований

Экспериментальные исследования выполнялись на производственном участке в ООО «ИТС–Сибирь». Резку осуществляли на плазматроне с обратной полярностью. Внешний вид установки плазменной резки представлен на рис. 1. Установка состоит из рабочего стола для установки заготовок, плазматрона, перемещающейся каретки и направляющих для перемещения плазматрона. В ее состав также входит блок газоподготовки и силовая установка. Использовали в эксперименте оборудование с плазматроном с обратной полярностью. В качестве защитного газа применяли азот.

В качестве экспериментального материала был использован листовый прокат меди марки М1 толщиной 40 мм, алюминиевого сплава Д16Т толщиной 12 и 40 мм, и титанового сплава ОТ4-1 толщиной 5 и 10 мм. Образцы титанового сплава толщиной 10 мм использовались в виде сложенных двух листов толщиной 5 мм. Это было сделано для дополнительного выявления особенностей резки пакетов листового проката, в значительной степени изменяющихся при наличии поверхности раздела между разрезаемыми листами. Использованные в исследовании параметры процесса резки приведены в табл. 1.



Рис. 1. Установка плазменной резки:

a – внешний вид установки; *б* – снимок процесса резки; *в* – внешний вид плазматрона; 1 – рабочий стол; 2 – плазматрон; 3 – каретка; 4 – направляющие для поперечного перемещения; 5 – направляющие для продольного перемещения

Fig. 1. Plasma cutter:

a – plasma cutter appearance; *б* – an image of the cutting process; *в* – plasmatron appearance; 1 – work table; 2 – plasmatron; 3 – carriage; 4 – linear guides for transverse movement; 5 – linear guides for longitudinal movement

Таблица 1

Table 1

Режимы плазменной резки

Plasma cutting modes

Сплав / Alloy	S , мм / S , mm	Номер режима / Mode No.	Задержка прожига, с / Delay of pierce, s	Высота прожига, мм / Height of pierce, mm	Высота резки, мм / Cutting height, mm	I , А / I , A	U , В / U , V	V , мм/мин / V , mm/min
ОТ4-1	5	1	0,4	6,07	2,54	130	154	2400
ОТ4-1	5	2	0,4	6,07	2,54	130	154	2000
ОТ4-1	5	3	0,4	6,07	2,54	130	154	1600
ОТ4-1	10	1	0,5	6,07	2,54	130	171	1600
ОТ4-1	10	2	0,5	6,07	2,54	130	171	1200
ОТ4-1	10	3	0,5	6,07	2,54	130	171	1400
Д16Т	12	1	0,4	–	3,81	300	170	4542
Д16Т	12	2	0,4	–	3,81	300	170	3000
Д16Т	12	3	0,4	–	3,81	300	170	2000
Д16Т	12	4	0,4	–	3,81	300	170	6000
Д16Т	12	5	0,4	–	3,81	300	170	8000
Д16Т	40	1	0,6	–	6,35	300	205	559
Д16Т	40	2	0,4	–	6,35	300	205	559
Д16Т	40	3	0,6	–	6,35	300	205	450
Д16Т	40	4	0,6	–	6,35	300	205	400
Д16Т	40	5	0,6	–	6,35	300	205	300
Д16Т	40	6	0,6	–	4,0	300	205	300
Д16Т	40	7	0,4	–	4,0	300	205	300
Д16Т	40	8	0,6	–	4,0	300	205	650

Окончание табл. 1

The End Table 1

Сплав / Alloy	S , мм / S , mm	Номер режима / Mode No.	Задержка прожига, с / Delay of pierce, s	Высота прожига, мм / Height of pierce, mm	Высота резки, мм / Cutting height, mm	I , А / I , A	U , В / U , V	V , мм/мин / V , mm/min
Д16Т	40	9	0,6	–	4,0	300	205	750
Д16Т	40	10	0,6	–	4,0	300	205	800
М1	40	1	0,5	6,35	6,35	300	205	450
М1	40	2	2,0	6,35	4,35	300	205	450
М1	40	3	2,0	6,35	4,35	300	205	300
М1	40	4	4,0	6,35	4,35	300	205	250
М1	40	5	6,0	6,35	4,35	300	205	150
М1	40	6	6,0	4,0	4,35	300	205	150
М1	40	7	6,0	4,0	4,35	300	205	100

Параметры процесса плазменной резки определяли эмпирически на основании типовых параметров, используемых при резке металлов и сплавов на стандартном оборудовании. Длину реза варьировали от 100 до 300 мм. Подбор параметров осуществляли до достижения относительно равномерного реза, который определяли с использованием визуально-измерительного контроля. Методически работы строилась таким образом, чтобы в процессе испытаний была определена оптимальная скорость резки, необходимая для наиболее быстрого получения качественного реза с наименьшими искажениями макрогеометрии, зоной термического влияния и наиболее равномерной поверхностью реза. Для этого изначально использовались различные параметры тока и скорости резки, после чего при удовлетворительном качестве реза производилось увеличение скорости резки. При неудовлетворительном качестве реза скорость снижалась. Дополнительно осуществлялся подбор параметров времени и высоты прожига, высоты резки и др.

После проведения экспериментальных работ по плазменной резке производились исследования поверхности реза образцов как с помощью визуально-измерительного контроля со съемкой поверхности, так и с помощью камеры Pentax К-3 с фокусным расстоянием объектива 100 мм. Для металлографических исследований образцов использовался оптический микроскоп Альтами МЕТ 1С. Микротвердость определяли с использованием твердомера Duramin 5. Изме-

рения микротвердости проводили на металлографических шлифах начиная с 10 мкм от поверхности реза. Глубина, на которую определяли изменения микротвердости, выбиралась исходя из размера зоны термического влияния. Вырезка образцов для исследований осуществлялась электроэрозионным методом на электроэрозионном станке DK7750 поперечно плоскости реза. Дополнительно с использованием конфокального микроскопа Olympus LEXT 4100 оценивалась поверхность реза с определением высоты неровностей над поверхностью реза. Общие выводы о качестве реза формулировались исходя из оценки всех основных факторов и зависели от суммарной глубины от поверхности реза микронеровностей, нарушения макрогеометрии и зоны термического влияния. Дополнительно учитывалось расположение указанных дефектов, так как нарушение макрогеометрии реза и зона термического влияния частично пересекаются.

Результаты и их обсуждение

В процессе плазменной резки образцов металлов и сплавов на поверхности реза формируется специфический рельеф, имеющий различное строение для различных сплавов. Например, поверхность реза титанового сплава для большинства образцов характеризуется наличием регулярного рельефа, различающегося в верхней и нижней части (1, 2, рис. 2, а). Причем достаточно четко различается внешний вид поверхности образца в верхней и нижней части реза, что мо-

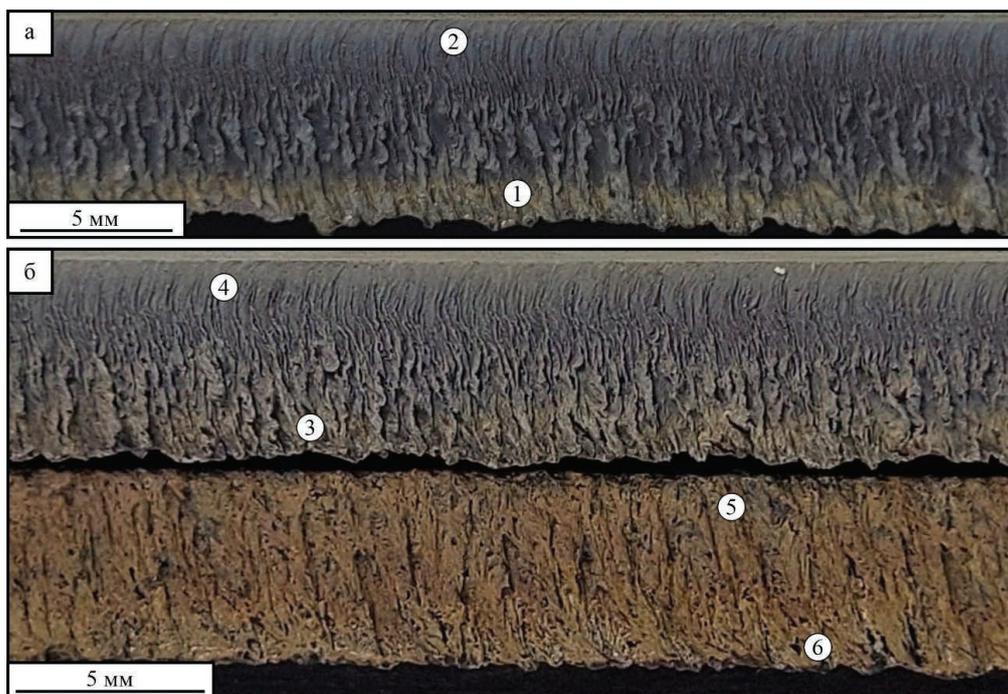


Рис. 2. Внешний вид поверхности реза образцов титанового сплава ОТ4-1:

a, б – две пластины толщиной 5 мм; 1 – нижняя часть поверхности реза; 2 – верхняя часть поверхности реза; 3 – нижняя часть поверхности реза верхней пластины; 4 – верхняя часть поверхности реза верхней пластины; 5 – верхняя часть поверхности реза нижней пластины; 6 – нижняя часть поверхности реза нижней пластины

Fig. 2. Appearance of the cut face of the titanium alloy samples:

a – the plate is 5 mm thick; *б* – two plates are 5 mm thick; 1 – bottom of the cut face; 2 – top of the cut face; 3 – bottom of the cut face of upper plate; 4 – top of the cut face of upper plate; 5 – top of the cut face of lower plate; 6 – bottom of the cut face of lower plate

жет быть связано с различными особенностями вытеснения расплавленного металла струей газа из зоны реза.

В верхней части образцов высота выступов над поверхностью реза составляет в среднем 70...75 мкм, в то время как в нижней части она составляет более 245...275 мкм в зависимости от режима резки (наименьшие значения характерны для режима со скоростью резки 2000 мм/мин, см. табл. 1). Образованы данные выступы потоками расплавленного металла, выдуваемого струей газа из зоны реза, быстро затвердевающими при отводе плазматрона от точки реза. Как видно из оптических фотографий и из результатов лазерной сканирующей микроскопии, выступы в верхней части реза, помимо меньшего размера, можно охарактеризовать меньшим по сравнению с выступами в нижней части образца расстоянием между ними. На поверхности как в верхней, так и в нижней части образца можно видеть достаточно явные признаки окисления

(рис. 2, *a*), несмотря на применение в процессе резки защитного газа. В нижней части реза можно выделить неравномерность кромки, которая образуется при резке в результате вытеснения металла из области реза, и его кристаллизацию с образованием небольшого наплыва.

При плазменной резке образцов титанового сплава ОТ4-1 толщиной 10 мм вследствие увеличенной толщины материала и сложенных внахлест листов вытеснение расплавленного металла из зоны резки было затруднено. По этой причине различие в особенностях строения верхней и нижней части реза становится ещё более существенным. На рис. 2, *б* представлены изображения поверхности верхней и нижней пластины после резки по режиму № 1 (см. табл. 1).

Поверхность верхней пластины после резки достаточно близка к наблюдаемой ранее на образцах толщиной 5 мм. В верхней части верхней пластины высота неровностей над поверхностью реза составляет не более 110...150 мкм,

в то время как внизу пластины она может достигать до 205...215 мкм и более. Существенно большие величины неровностей и неоднородность строения поверхности характерны для нижней пластины. В верхней части нижней пластины величина неровностей составляет до 200...305 мкм, а в нижней части до 330...680 мкм. Наименьшая величина выступов и впадин характерна для образцов, полученных по режиму № 1. Периодичность формирующихся выступов на поверхности пластин изменяется от верхней части к нижней. Наименьшее расстояние между выступами можно отметить в верхней части верхней пластины. Далее в направлении к нижней части реза происходит увеличение расстояния между неровностями и достигает максимума в нижней пластине. Несмотря на наибольшую величину неровностей на поверхности реза в нижней пластине, в ней формируется рез с наиболее однородным распределением выступов и впадин на поверхности. В нижней пластине рез практически не изменяется по высоте или по длине пластины. Направление сформированных выступов на поверхности нижней пластины также не изменяется, в то время как в верхней пластине оно существенно изменяется от верхней к нижней части. На поверхности и верхней, и нижней пластины можно выделить следы окисления материала при резке (рис. 2, б). Причем окисление, судя по внешнему виду поверхности, происходит в различной степени у верхней и нижней пластины. В нижней части отмечается формирование небольших наплывов в обеих пласти-

нах, но в нижней пластине наплыв формируется существенно меньшего размера, и нижний край реза в данном случае более равномерен по длине пластины.

Подбор параметров режимов плазменной резки алюминиевого сплава Д16Т толщиной 12 мм производился с использованием параметров, приведенных в табл. 1. Низкая скорость резки (режим № 3) образцов сплава Д16Т толщиной 12 мм обуславливает низкое качество поверхности реза (рис. 3, а). В данном случае имеются резкие отличия между верхней и нижней зоной реза с наличием мелких и квазипериодических элементов рельефа в верхней части и крупных элементов в нижней. При большей скорости резки (режим № 4) достигается достаточно однородная поверхность реза (рис. 3, б). Величина неровностей над поверхностью реза составила 50...150 мкм в верхней части реза и 80...260 мкм в нижней части. Наименьшие неровности характерны для образцов, полученных по режиму № 4. На поверхности реза также не выделено ярко выраженных окислов или каких-либо включений иного характера.

При плазменной резке образцов алюминиевого сплава Д16Т толщиной 40 мм был выявлен ряд особенностей. В данном случае большое значение имеет прогрев материала зоны реза, в результате чего на начальном участке реза практически у всех образцов происходит отклонение расположения оси реза от заданного значения (рис. 4). На поверхности реза присутствует большое количество элементов рельефа с



Рис. 3. Внешний вид поверхностей реза образцов сплава Д16Т толщиной 12 мм:

а – образец после резки в неоптимальном режиме; б – образец после резки в оптимальном режиме;
1 – нижняя часть поверхности реза; 2 – верхняя часть поверхности реза

Fig. 3. Cut faces appearance of specimens of aluminum alloy with a thickness of 12 mm:

а – specimen after cutting in non-optimal mode; б – specimen after cutting in optimal mode; 1 – bottom of the cut face; 2 – top of the cut face

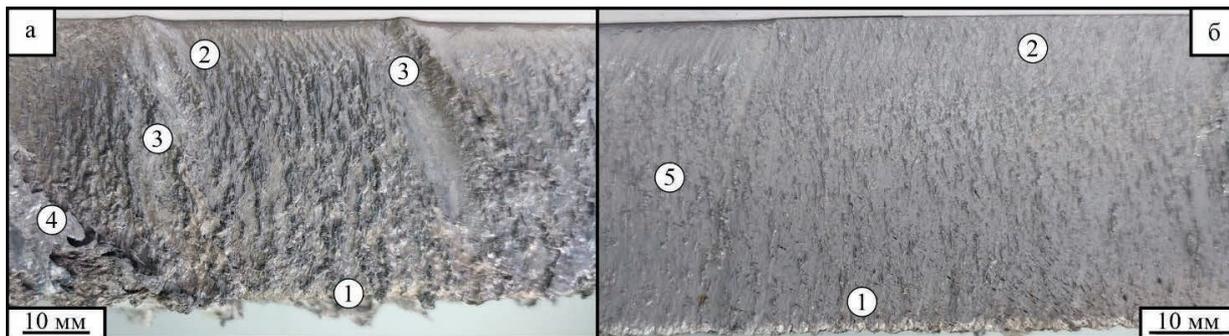


Рис. 4. Внешний вид поверхностей реза образцов сплава Д16Т толщиной 40 мм:

a – образец после резки в неоптимальном режиме; *б* – образец после резки в оптимальном режиме; 1 – нижняя часть поверхности реза; 2 – верхняя часть поверхности реза; 3 – макродефекты поверхности реза; 4, 5 – дефекты в начальной части поверхности реза

Fig. 4. Cut faces appearance of specimens of aluminum alloy with a thickness of 40 mm:

a – specimen after cutting in non-optimal mode; *б* – specimen after cutting in optimal mode; 1 – bottom of the cut face; 2 – top of the cut face; 3 – macrodefects of the cut face; 4, 5 – defects in the initial part of the cut face

их периодическим расположением в верхней и менее упорядоченным в нижней части образца. В нижней части зоны реза отмечается небольшое количество металла, формирующего локальные участки наплывов, что показывает лучшее вытеснение расплавленного металла из полости реза. Для образцов, полученных по неоптимальным режимам, характерны существенные неоднородности поверхности реза, в том числе макроскопической величины (режим № 9, рис. 4, *a*). Для образцов, полученных по более оптимальным режимам, характерно более равномерное строение поверхности реза (режим № 7, рис. 4, *б*). Величина выступов над поверхностью реза составляет 200...470 мкм в верхней части образца и 230...600 мкм – в нижней.

При плазменной резке образцов меди марки М1 наблюдается образование наиболее крупных наплывов в нижней части реза (рис. 5). Это обусловлено высокой теплопроводностью меди и свидетельствует о том, что расплавленный металл, вытесняемый струей газа из полости реза, затвердевал с достаточно высокой скоростью. Во многих участках реза наплывы практически отсутствуют, но корректировкой параметров режима резки не удалось добиться их полного отсутствия. Величина неровностей на поверхности реза составляет 25...80 мкм в верхней части и 65...200 мкм в нижней части реза. Наименьшие значения высот неровностей характерны для образцов, полученных по режиму № 5.

Исследованиями структуры образцов сплава ОТ4-1 толщиной 5 мм в поперечном сече-

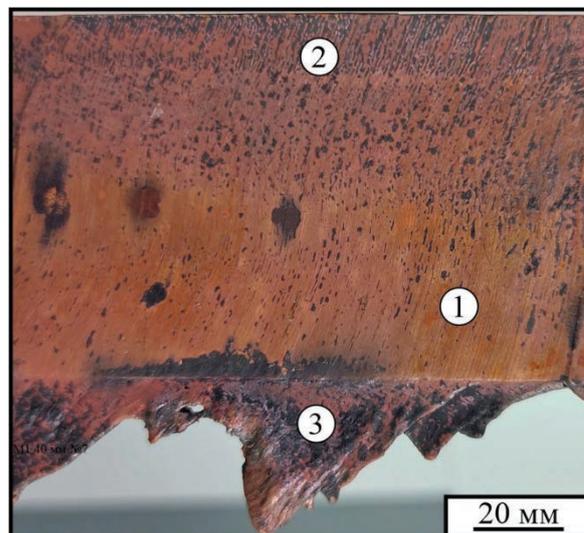


Рис. 5. Внешний вид поверхности реза образцов меди марки М1 толщиной 40 мм:

1 – нижняя часть реза; 2 – верхняя часть реза; 3 – наплыв

Fig. 5. Cut faces appearance of specimens of copper with a thickness of 40 mm:

1 – bottom of the cut face; 2 – top of the cut face; 3 – a flowed metal

нии относительно плоскости реза выявлено, что в образцах происходит достаточно существенное искажение макрогеометрии реза, особенно в верхней части образца (рис. 6, *a, б*). Кроме того, существенно различается размер зоны термического влияния (рис. 6, *б, в*), составляющий 415...520 мкм в верхней части реза и 800...1820 мкм в нижней части. Меньшие значения характерны для режима № 2. Внизу зоны реза четко выделяется

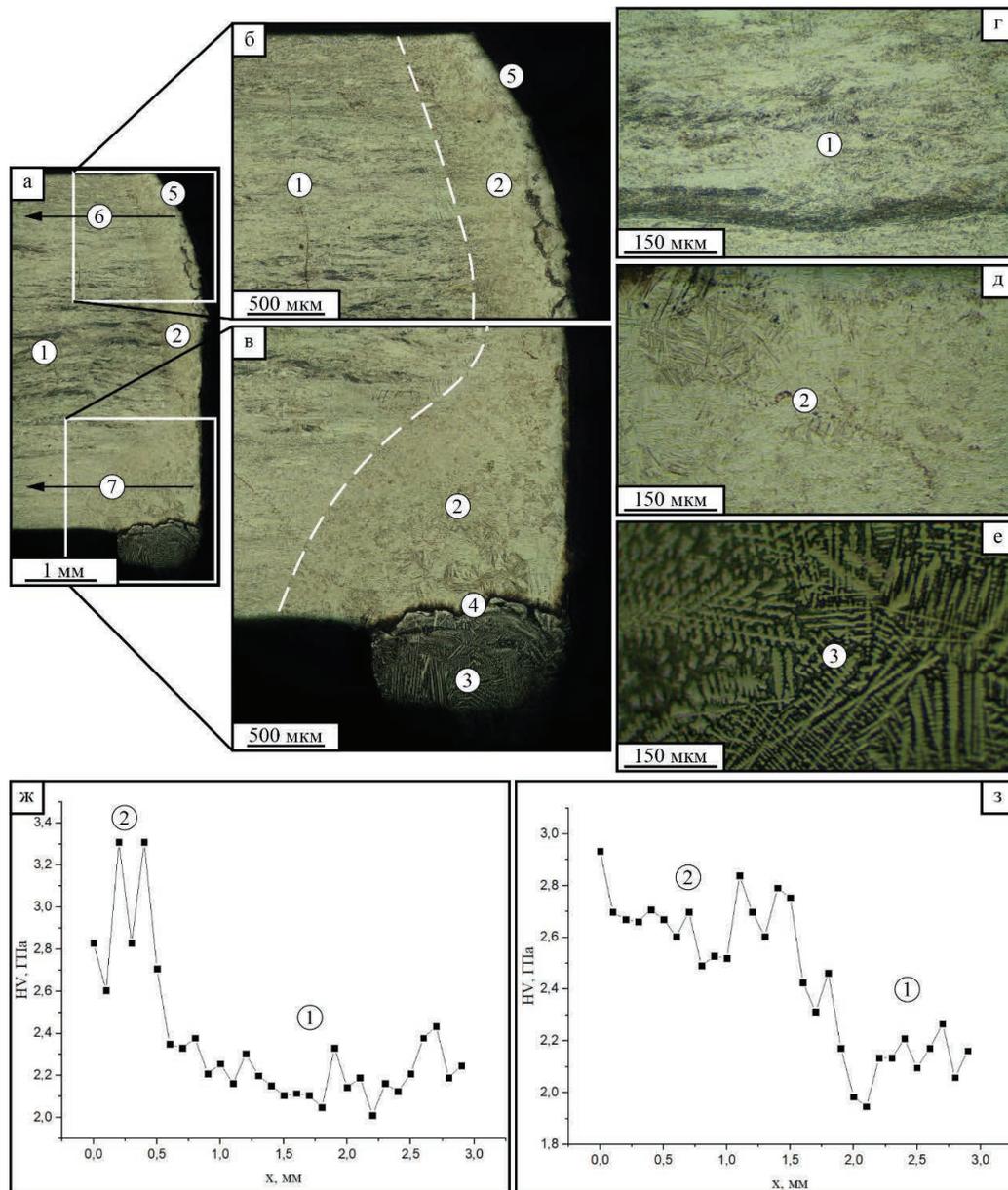


Рис. 6. Макро- и микроструктура типичного образца сплава ОТ4-1 толщиной 5 мм после плазменной резки:

a – макроструктура; *б, в* – увеличенные изображения верхней и нижней части зоны реза; *г, д, е* – микроструктура характерных зон; *ж, з* – изменение микротвердости; 1 – основной металл; 2 – зона термического влияния; 3 – зона переплава; 4 – граница между зонами; 5 – нарушение макрогеометрии; 6, 7 – области измерения микротвердости

Fig. 6. Macro- and microstructure of typical specimen of titanium alloy with a thickness of 5 mm after plasma cutting:

a – macrostructure; *б, в* – enlarged images of the upper and lower parts of cut zone; *г, д, е* – microstructure of specific zones; *ж, з* – microhardness variation; 1 – base metal; 2 – heat-affected zone; 3 – melting zone; 4 – zone boundary; 5 – macrogeometry failure; 6, 7 – areas of microhardness testing

наличие напылов с дендритной структурой (рис. 6, в). Это обусловлено вытеснением расплавленного металла из зоны реза, его стеканием в нижнюю часть реза и затвердеванием в ней в виде напыла.

Исследования закономерностей организации структуры при большем увеличении показывают, что структурные изменения при резке по различным режимам являются типичными для сплавов данного типа. В зоне основного металла

(рис. 6, *з*) характерно типичное строение с вытянутыми в направлении прокатки зернами.

В зоне термического влияния происходит нагрев выше температуры полиморфного превращения и последующая закалка с образованием игольчатой структуры, близкой для всех трех режимов резки (рис. 6, *д*). Зона плавления металла, преимущественно находящаяся в области наплывов, представлена дендритной структурой (рис. 6, *е*), сформированной при достаточно быстрой кристаллизации из жидкого состояния, что приводит к формированию достаточно мелких дендритов. Описанные изменения структуры в зоне реза неминуемо приводят к изменениям механических свойств материала, что может быть недопустимо в различных условиях. Для исследований изменений механических свойств поверхности реза далее в работе были проведены измерения микротвердости приповерхностной зоны. Результаты измерения микротвердости в образцах показывают, что в зоне термического влияния происходит увеличение микротвердости материала (рис. 6, *ж, з*) как в верхней, так и в нижней части образца. На расстоянии до 2000 мкм от поверхности реза значения микротвердости находятся на уровне, близком к основному металлу. В целом все три выбранных режима достаточно хорошо подходят для получения изделий методом плазменной резки. С точки зрения наименьших значений припуска на последующую обработку более оптимальным можно считать режим № 2, характеризующийся средней скоростью резки и наименьшей глубиной зоны термического влияния (до 880 мкм). Следует отметить, что при резке титанового сплава происходит закалка металла в зоне термического влияния с увеличением микротвердости, что может снизить обрабатываемость материала при последующей фрезеровке кромок.

Структура области реза образцов титанового сплава ОТ4-1 из двух пластин толщиной 5 мм, сложенных в пакет, достаточно близка к описанной ранее (рис. 7, *а*). В верхней части верхней пластины наблюдается существенное искажение макрогеометрии, а зона термического влияния увеличивается к нижней части обеих пластин (рис. 7, *а–д*). В то же время для нижней пластины характерна достаточно равномерная форма края реза. При этом на поверхности реза верхней пластины присутствует лишь небольшое ко-

личество переплавленного материала, в то время как на поверхности реза нижней пластины может присутствовать значительный по толщине слой с дендритной структурой (рис. 7, *а, з, д*). Величина зоны термического влияния в верхней части верхней пластины составляет 550...700 мкм, в нижней части 1150...1300 мкм, в верхней части нижней пластины 800...950 мкм, в её нижней части 1900...2300 мкм. Наименьшие величины зоны термического влияния характерны для режима резки № 1. Металл оплавленной зоны достаточно неравномерно распределен по поверхности реза. Между оплавленным металлом и основой образца происходит образование дефектов в виде пор или несплошностей. Данные участки подлежат удалению при последующей механической обработке материала. Организация структуры внутри типичных структурных зон образцов аналогична наблюдаемой при резке образцов толщиной 5 мм. Измерения микротвердости (рис. 7, *е–и*) также показывают, что в приграничной области происходит резкое увеличение микротвердости материала по сравнению с основным металлом. Исследования показывают достаточно высокую степень применимости всех трех режимов плазменной резки образцов общей толщиной 10 мм аналогично резке образцов толщиной 5 мм. Наиболее оптимальным является режим № 1, поскольку он характеризуется меньшей глубиной зоны термического влияния.

Структурные изменения в зоне плазменной резки образцов сплава Д16Т толщиной 12 мм отличаются от описанных ранее для титанового сплава (рис. 8). Для всех исследованных образцов характерно наличие зоны плавления металла, зоны термического влияния и основного металла с неизменной структурой. Для большинства образцов можно выделить нарушения макрогеометрии и образование наплывов из переплавленного в полости реза материала, скопившегося в нижней части реза.

Зона термического влияния в образцах представлена практически недеформированной структурой основного металла с повышенной относительно него травимостью (рис. 8, *а–в*). Величина зоны термического влияния составляет порядка 100...200 мкм в верхней части и 600...2000 мкм в нижней, с наименьшими значениями для режима № 2. Для всех образцов характерно идентичное строение в исходном

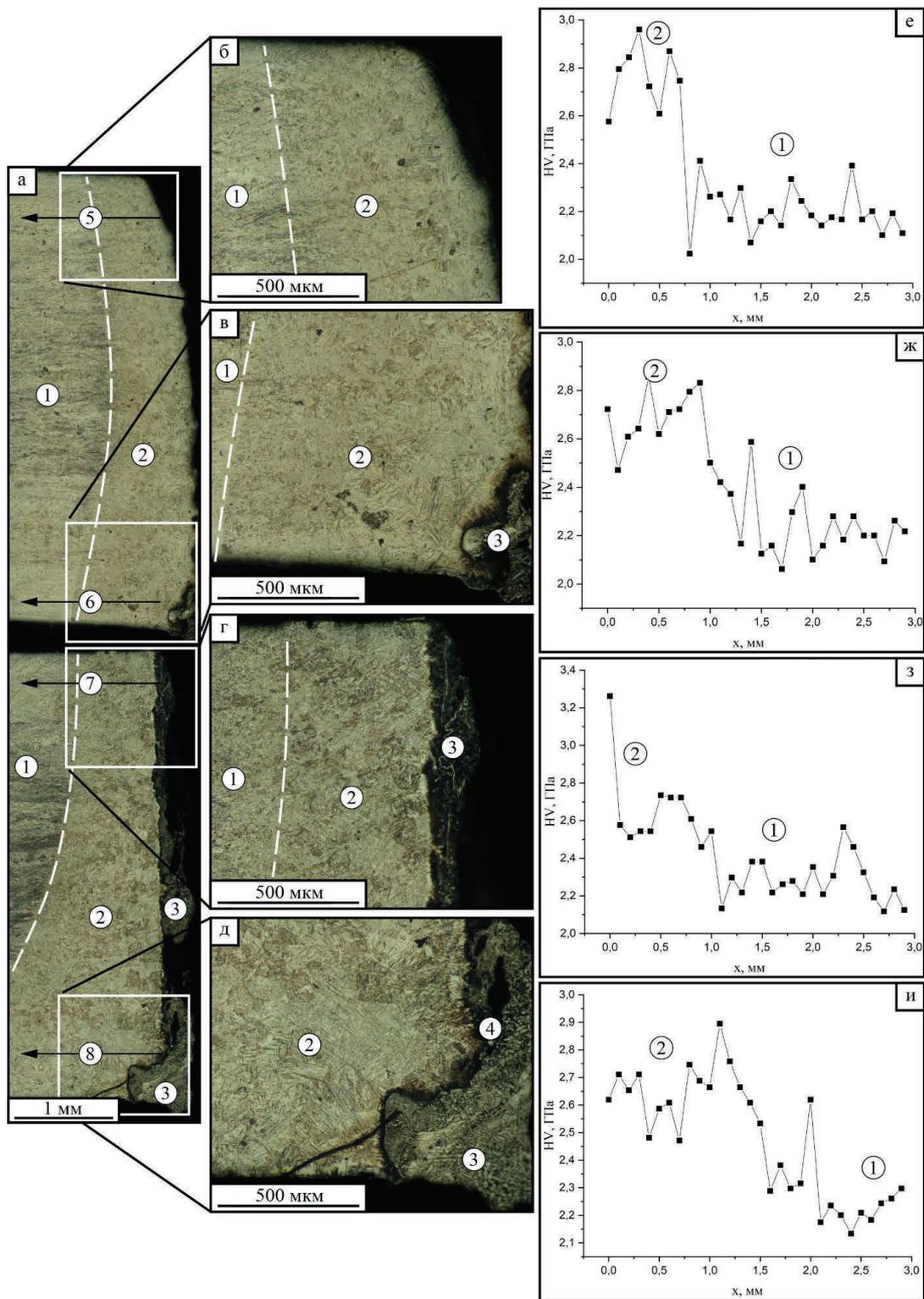


Рис. 7. Макро- и микроструктура типичного образца пакета из двух листов сплава ОТ4-1 толщиной 5 мм после плазменной резки:

а – макроструктура; *б, в, г, д* – увеличенные изображения верхней и нижней части; *е, ж, з, и* – изменение микротвердости; 1 – основной металл; 2 – зона термического влияния; 3 – зона переплава; 4 – граница между зонами; 5–8 – области измерения микротвердости

Fig. 7. Macro- and microstructure of typical package specimen of two sheets of titanium alloy with a thickness of 5 mm after plasma cutting:

а – macrostructure; *б, в, г, д* – microstructure of specific zones; *е, ж, з, и* – microhardness variation; 1 – base metal; 2 – heat-affected zone; 3 – melting zone; 4 – zone boundary; 5–8 – areas of microhardness testing

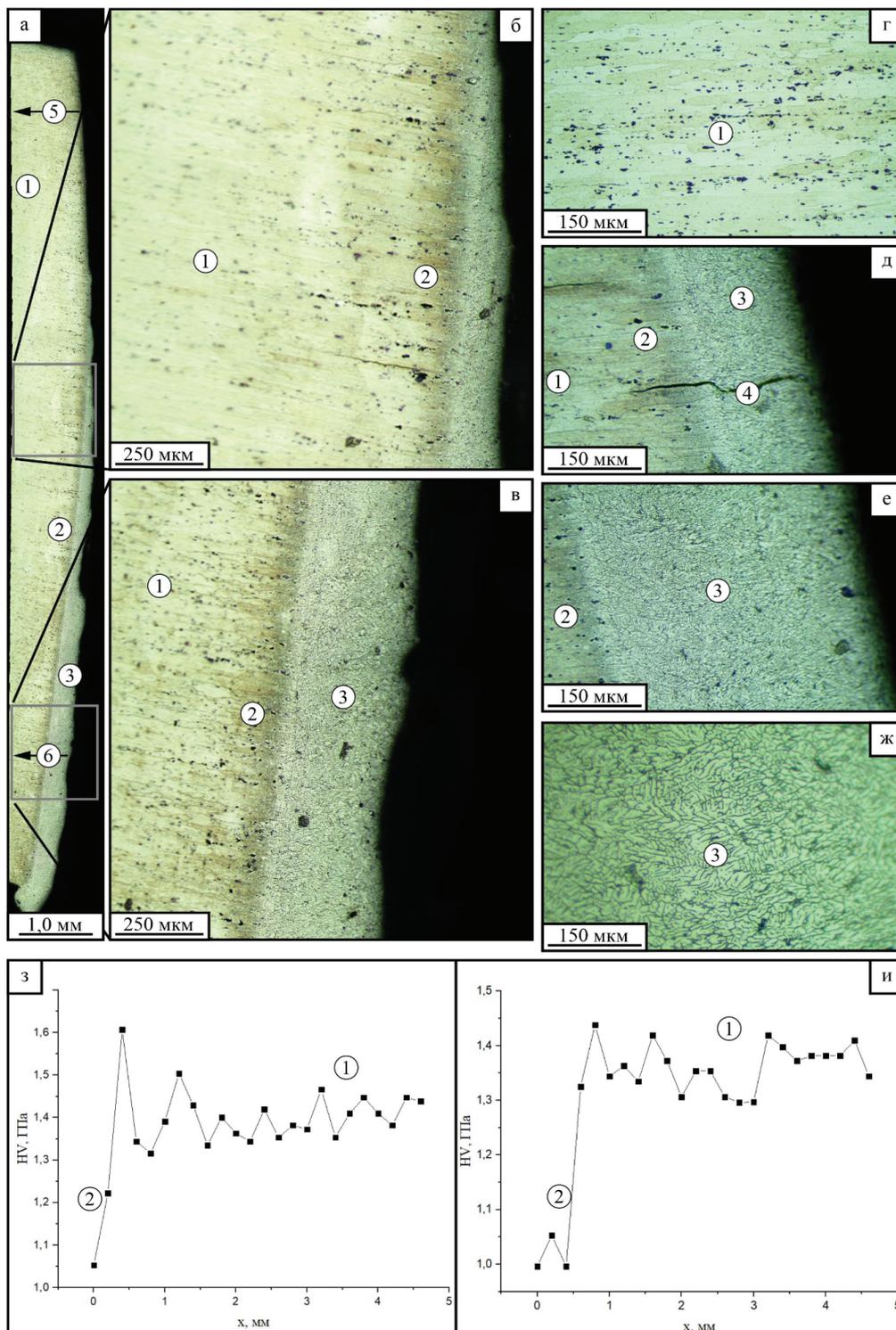


Рис. 8. Макро- и микроструктура типичного образца сплава Д16Т толщиной 12 мм после плазменной резки:

а – макроструктура; б, в – увеличенные изображения верхней и нижней части зоны реза; г, д, е, ж – микроструктура характерных зон; з, и – изменение микротвердости; 1 – основной металл; 2 – зона термического влияния; 3 – зона переплава; 4 – трещина; 5, 6 – области измерения микротвердости

Fig. 8. Macro- and microstructure of typical specimen of aluminum alloy with a thickness of 12 mm after plasma cutting:

а – macrostructure; б, в – enlarged images of the upper and lower parts of cut zone; г, д, е, ж – microstructure of specific zones; з, и – microhardness variation; 1 – base metal; 2 – heat-affected zone; 3 – melting zone; 4 – zone boundary; 5, 6 – areas of microhardness testing

состоянии (рис. 8, *з*). В зоне плавления формируется типичная структура с дендритным строением, образующаяся при стекании расплавленного металла вниз по поверхности реза (рис. 8, *д–ж*). За счет высокой скорости кристаллизации металла на поверхности реза происходит образование мелкодендритной структуры и дефектов в виде трещин (рис. 8, *д*).

Изменения механических свойств в зоне резки были прослежены на образцах путем измерения микротвердости (рис. 8, *з, и*). Средняя величина микротвердости основного металла образцов составляет от 1,35 до 1,45 ГПа. В зоне термического влияния и зоне плавления происходит резкое падение микротвердости до величин 0,95...1,2 ГПа, что показывает достаточно существенное падение механических свойств в данных зонах. Граница между зоной термического влияния и зоной основного металла в верхней части образца является более резкой, чем в нижней.

Макроструктура образцов сплава Д16Т толщиной 40 мм, полученных по различным режимам плазменной резки, несколько отличается от описанной выше (рис. 9, *а–в*). Размер зоны термического влияния существенно выше и составляет 12...15 мм для большинства режимов резки. Наименьшие значения размера зоны термического влияния характерны для режима № 8, для которого величина зоны термического влияния составляет 4,0 мм в верхней части реза и 8,0 мм в нижней. Для данных образцов большое значение имеет отклонение геометрии реза в верхней части, составляющее от 0,7 до 5,2 мм.

Исследования структуры образцов при большем увеличении показывают, что строение материала в различных участках зоны реза представлено структурами, достаточно близкими к выявленным для образцов толщиной 12 мм (рис. 9, *з–е*). В зоне плавления структура представлена дендритным строением с большим количеством пор и несплошностей. Зона термического влияния отмечается повышенной травимостью по сравнению с основным металлом, она может дополнительно разделяться на две части, различные по степени травления.

При исходном значении микротвердости материала в 1,25...1,35 ГПа в зоне термического влияния возможно снижение микротвердости до

величин порядка 0,85...1,15 ГПа (рис. 9, *ж, з*). По изменениям микротвердости зона термического влияния также разделяется на две обособленные части.

При резке образцов меди марки М1 толщиной 40 мм обнаружено, что несмотря на большую толщину листового проката размер зоны термического влияния в образцах находится на достаточно низком уровне (рис. 10, *а–в*). Величина отклонения макрогеометрии реза образцов составляет не более 0,7 мм. Размер зоны плавления составляет до 0,15 мм. Визуально по металлографическим шлифам зона термического влияния практически не выделяется. Зеренная структура в ней аналогична строению основного металла (рис. 10, *б–г*). В зоне плавления в большом количестве присутствуют поры, несплошности и расслоения (рис. 10, *д, е*). Зона термического влияния была обнаружена только при анализе изменений микротвердости материала в зоне реза (рис. 10, *ж, з*). Величина зоны термического влияния составляет от 0,5 до 3,0 мм в зависимости от режима. Наименьшее значение характерно для режима № 7, который можно считать оптимальным с точки зрения припуска на последующую обработку.

Заключение

Исследования показывают, что для резки сплава Д16Т и титанового сплава ОТ4-1 при толщине до 12 мм можно в широком диапазоне регулировать скорость резки, в то время как для проката меди М1 и сплава Д16Т толщиной 40 мм диапазон регулирования скорости резки достаточно узок. Интенсивный теплоотвод медного проката позволяет получать рез с минимальными значениями зоны частичного или полного переплава металла, хотя и возможно получение в зоне реза достаточно крупных наплывов, состоящих из переплавленного металла, вытесняемого из зоны реза. Исследования процессов резки алюминиевого сплава Д16Т и титанового сплава ОТ4-1 позволили выявить глубину термического влияния резки, изменяющуюся от верхней к нижней части реза. В то же время для сплава Д16Т по причине избыточного выпадения легирующих элементов из твердого раствора в зоне термического влияния отмечалось падение микротвердости, для сплава ОТ4-1 характерным

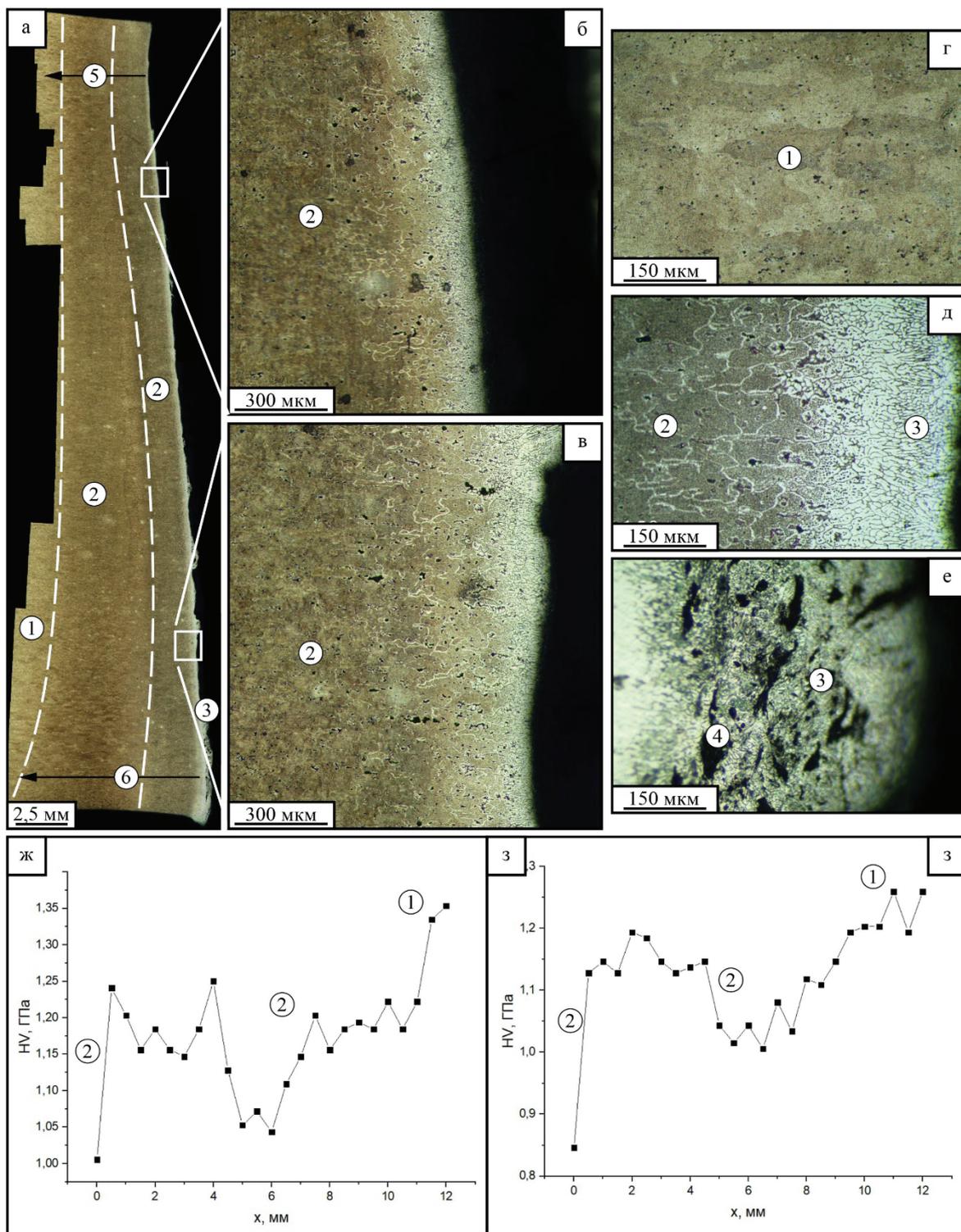


Рис. 9. Макро- и микроструктура типичного образца сплава Д16Т толщиной 40 мм после плазменной резки:

a – макроструктура; *б, в* – увеличенные изображения верхней и нижней части зоны реза; *г, д, е* – микроструктура характерных зон; *ж, з* – изменение микротвердости; 1 – основной металл; 2 – зона термического влияния; 3 – зона переплава; 4 – дефекты; 5, 6 – области измерения микротвердости

Fig. 9. Macro- and microstructure of typical specimen of aluminum alloy with a thickness of 40 mm after plasma cutting:

a – macrostructure; *б, в* – enlarged images of the upper and lower parts of cut zone; *г, д, е* – microstructure of specific zones; *ж, з* – microhardness variation; 1 – base metal; 2 – heat-affected zone; 3 – melting zone; 4 – defects; 5, 6 – areas of microhardness testing

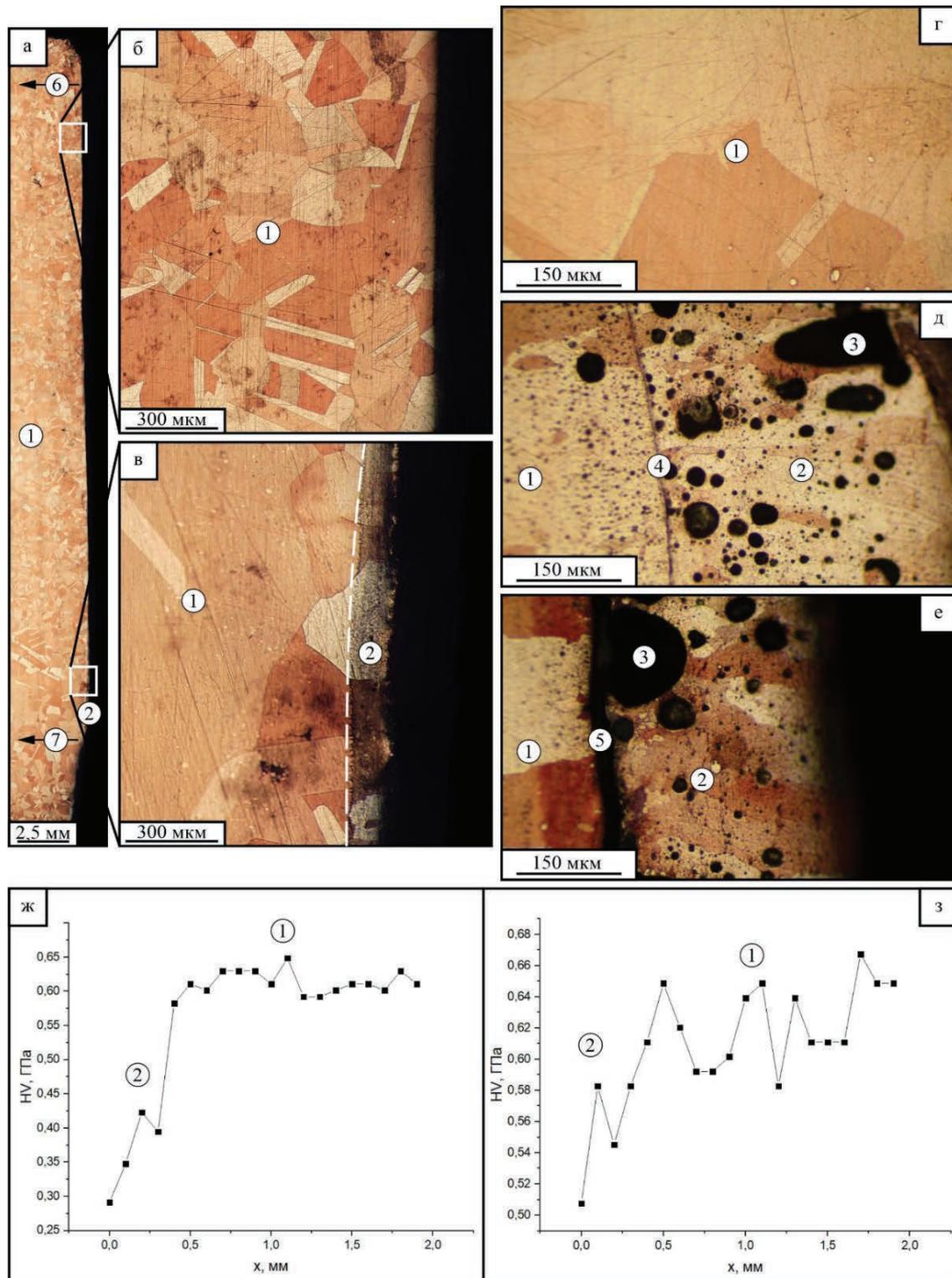


Рис. 10. Макро- и микроструктура типичного образца меди марки М1 толщиной 40 мм после плазменной резки:

а – макроструктура; б, в – увеличенные изображения верхней и нижней части; г, д, е – микроструктура характерных зон; ж, з – изменение микротвердости; 1 – основного металла; 2 – зона переплава; 3 – поры; 4, 5 – расслоение; б, 7 – области измерения микротвердости

Fig. 10. Macro- and microstructure of typical specimen of copper with a thickness of 40 mm after plasma cutting:

а – macrostructure; б, в – enlarged images of the upper and lower parts of cut zone; г, д, е – microstructure of specific zones; ж, з – microhardness variation; 1 – base metal; 2 – heat-affected zone; 3 – pores; 4, 5 – lamination; б, 7 – areas of microhardness testing

являлся рост микротвердости, обусловленный закалкой материала.

Анализ морфологии поверхности реза, макро- и микроструктуры материала в области реза, а также исследование изменений микротвердости позволили определить наиболее оптимальное сочетание параметров режима резки для получения наиболее качественного реза. Изменение параметров режима резки позволяет получать более однородную макрогеометрию поверхности реза, меньшую глубину зоны переплава материала и зоны термического влияния и меньшие изменения механических

свойств материала в зоне реза. Для сплава ОТ4-1 практически все использованные режимы резки являлись близкими к оптимальным, хотя некоторые из них обеспечивают несколько лучшее качество реза (режим № 2 – при резке листов толщиной 5 мм и режим № 1 – при резке образцов толщиной 10 мм). Для сплава Д16Т толщиной 12 мм лучшим режимом являлся режим № 2, а при толщине 40 мм – режим № 8. При резке меди марки М1 толщиной 40 мм лучшее качество реза достигалось при режиме № 7. Полученные результаты сведены в табл. 2.

Таблица 2

Table 2

Изменение показателей качества реза в зависимости от режимов плазменной резки
Change in cut quality indicators depending on plasma cutting modes

Сплав / Alloy	S, мм / S, mm	Номер режима / Mode No.	Величина микронеровностей, мкм / Roughnesses, μm	Величина искажений макрогеометрии, мм / Macrogeometry distortion, mm	Глубина зоны термического влияния, мм** / Depth of the heat-affected zone, mm**
ОТ4-1	5	1	75...275	0,5...0,6	0,5...1,8
ОТ4-1	5	2*	65...210	0,5...0,6	0,4...0,9
ОТ4-1	5	3	70...245	0,4...0,6	0,5...1,5
ОТ4-1	10	1*	150...330	0,6...1,9	0,3...0,4
ОТ4-1	10	2	110...450	0,6...2,3	0,3...0,4
ОТ4-1	10	3	110...680	0,7...1,9	0,4...0,6
Д16Т	12	1	50...80	1,3...1,5	0,5...0,8
Д16Т	12	2*	130...150	0,4...0,5	0,5...0,9
Д16Т	12	3	100...260	1,3...1,4	0,3...0,8
Д16Т	12	4	50...80	2,0...2,3	0,4...0,9
Д16Т	12	5	55...240	3,1...3,2	1,6...3,5
Д16Т	40	1	210...510	0,9...1,0	12,6...15,6
Д16Т	40	2	205...230	2,5...2,6	12,7...15,7
Д16Т	40	3	350...460	2,7...2,9	1,7...15,7
Д16Т	40	4	260...300	4,5...5,0	12,3...15,3
Д16Т	40	5	200...470	0,6...0,7	12,5...12,75
Д16Т	40	6	330...600	0,9...1,1	4,0...15,0
Д16Т	40	7	320...550	5,0...5,2	5,0...15,0
Д16Т	40	8*	470...570	2,8...3,0	4,5...8,5
Д16Т	40	9	470...570	1,3...1,5	12,0...13,0
Д16Т	40	10	125...520	1,1...1,3	13...16
М1	40	1	–	–	1,3...1,5
М1	40	2	–	–	0,8...0,9
М1	40	3	–	–	0,65...0,75
М1	40	4	80...180	1,2...1,4	2,8...3,0
М1	40	5	25...75	0,5...0,7	1,9...2,0
М1	40	6	7...65	1,0...1,2	2,7...3,0
М1	40	7*	45...200	0,9...1,0	1,8...1,9

* Наиболее оптимальные режимы плазменной резки

** В данном случае включается глубина зоны термического влияния и зоны плавления

По результатам работы можно сделать вывод, что плазменная резка на токах обратной полярности является эффективной для резки проката больших толщин, однако методика требует дальнейшей отработки с целью повышения качества получаемого реза. В дальнейших работах планируется проведение сравнительных исследований в области плазменной резки листового проката больших толщин с использованием плазмотронов с прямой и обратной полярностью.

Список литературы

1. *Akkurt A.* The effect of cutting process on surface microstructure and hardness of pure and Al 6061 aluminium alloy // *Engineering Science and Technology, an International Journal.* – 2015. – Vol. 18, iss. 3. – P. 303–308. – DOI: 10.1016/j.jestch.2014.07.004.
2. *Ilii S.M., Coteata M.* Plasma arc cutting cost // *International Journal of Material Forming.* – 2009. – Vol. 2. – P. 689–692. – DOI: 10.1007/s12289-009-0588-4.
3. Optimization of surface roughness in plasma arc cutting of AISID2 steel using TLBO / P. Patel, B. Nakum, K. Abhishek, V. Rakesh Kumar, A. Kumar // *Materials Today: Proceedings.* – 2018. – Vol. 5, iss. 9 (3). – P. 18927–18932. – DOI: 10.1016/j.matpr.2018.06.242.
4. Experimental study of the features of the kerf generated by a 200A high tolerance plasma arc cutting system / R. Bini, B.M. Colosimo, A.E. Kutlu, M. Monno // *Journal of Materials Processing Technology.* – 2008. – Vol. 196, iss. 1–3. – P. 345–355. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.05.061.
5. *Hoult A.P., Pashby I.R., Chan K.* Fine plasma cutting of advanced aerospace materials // *Journal of Materials Processing Technology.* – 1995. – Vol. 48, iss. 1–4. – P. 825–831. – DOI: 10.1016/0924-0136(94)01727-I.
6. Modeling of surface roughness in plasma jet cutting process of thick structural steel / I. Peko, B. Nedic, A. Djordjevic, D. Dzunic, M. Janković, I. Veza // *Tribology in Industry.* – 2016. – Vol. 38, № 4. – P. 522–529.
7. Characterization of heat affected zones produced by thermal cutting processes by means of Small Punch tests / D. Andrés, T. García, S. Cicero, R. Lacalle, J.A. Álvarez, A. Martín-Meizoso, J. Aldazabal, A. Bannister, A. Klimpel // *Materials Characterization.* – 2016. – Vol. 119. – P. 55–64. – DOI: 10.1016/j.matchar.2016.07.017.
8. *Gariboldi E., Previtali B.* High tolerance plasma arc cutting of commercially pure titanium // *Journal of Materials Processing Technology.* – 2005. – Vol. 160, iss. 1. – P. 77–89. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.04.366.
9. *Nandan Sharma D., Ram Kumar J.* Optimization of dross formation rate in plasma arc cutting process by response surface method // *Materials Today: Proceedings.* – 2020. – Vol. 32, pt. 3. – P. 354–357. – DOI: 10.1016/j.matpr.2020.01.605.
10. An experimental analysis of cutting quality in plasma arc machining / M. Gostimirović, D. Rodic, M. Sekulić, A. Aleksic // *Advanced Technologies and Materials.* – 2020. – Vol. 45, N 1. – P. 1–8. – DOI: 10.24867/ATM-2020-1-001.
11. Plasma arc cutting dimensional accuracy optimization employing the parameter design approach / J. Kechagias, M. Petousis, N. Vidakis, N. Mastorakis // *ITM Web of Conferences.* – 2017. – Vol. 9. – P. 03004. – DOI: 10.1051/itmconf/20170903004.
12. *Cinar Z., Asmael M., Zeeshan Q.* Developments in plasma arc cutting (PAC) of steel alloys: a review // *Jurnal Kejuruteraan.* – 2018. – Vol. 30. – P. 7–16. – DOI: 10.17576/jkukm-2018-30(1)-02.
13. *Kudrna L., Fries J., Merta M.* Influences on plasma cutting quality on CNC machine // *Multidisciplinary Aspects of Production Engineering.* – 2019. – Vol. 2. – P. 108–117. – DOI: 10.2478/mape-2019-0011.
14. Влияние конструктивных особенностей плазмотрона на качество реза при прецизионной воздушно-плазменной разделке металла / С.В. Анахов, Б.Н. Гузанов, А.В. Матушкин, Н.Б. Пугачева, Ю.А. Пыкин // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия.* – 2020. – Т. 63, № 2. – С. 155–162. – DOI: 10.17073/0368-0797-2020-2-155-162.
15. Modeling and optimization of cut quality responses in plasma jet cutting of aluminium alloy EN AW-5083 / I. Peko, D. Marić, B. Nedić, I. Samardžić // *Materials.* – 2021. – Vol. 14, iss. 19. – P. 5559. – DOI: 10.3390/ma14195559.
16. *Salonitis K., Vatousianos S.* Experimental Investigation of the Plasma Arc Cutting Process // *Procedia CIRP.* – 2012. – Vol. 3. – P. 287–292. – DOI: 10.1016/j.procir.2012.07.050.
17. *Suresh A., Diwakar G.* Optimization of process parameters in plasma arc cutting for TWIP steel plates // *Materials Today: Proceedings.* – 2021. – Vol. 38, pt. 5. – P. 2417–2424. – DOI: 10.1016/j.matpr.2020.07.383.
18. *Nemchinsky V.* Erosion of thermionic cathodes in welding and plasma arc cutting systems // *IEEE Transactions on Plasma Science.* – 2014. – Vol. 42, N 1. – P. 199–215. – DOI: 10.1109/TPS.2013.2287794.
19. *Matushkina I., Anakhov S., Pyckin Yu.* Design of a new gas-dynamic stabilization system for a metal-cutting plasma torch // *Journal of Physics: Conference Series.* – 2021. – Vol. 2094. – P. 042075. – DOI: 10.1088/1742-6596/2094/4/042075.
20. *Shchitsyn V.Yu., Yazovskikh V.M.* Effect of polarity on the heat input into the nozzle of a plasma

torch // Welding International. – 2002. – Vol. 16 (6). – P. 485–487. – DOI: 10.1080/09507110209549563.

21. Особенности теплопередачи в изделие при работе плазмотрона на токе обратной полярности / Ю.Д. Щицын, Д.С. Белинин, П.С. Кучев, С.Д. Неулыбин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2014. – Т. 16, № 2. – С. 42–50. – DOI: 10.15593/.v16i2.3275.

22. Исследование работы анодов дуговых плазмотронов для работы на обратной полярности тока / Ю.Д. Щицын, В.Ю. Щицын, С.Д. Неулыбин, Р.Г. Никулин, С.Г. Никулина, К.П. Карунакаран // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2020. – Т. 22, № 3. – С. 60–67. – DOI: 10.15593/2224-9877/2020.3.08.

Конфликт интересов

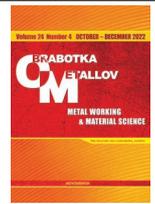
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2022 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Development of plasma cutting technique for C1220 copper, AA2024 aluminum alloy, and Ti-1,5Al-1,0Mn titanium alloy using a plasma torch with reverse polarity

Valery Rubtsov ^{a, *}, Alexander Panfilov ^b, Knyazhev Evgeny ^c, Alexandra Nikolaeva ^d, Andrey Cheremnov ^e,
 Anastasia Gusarova ^f, Vladimir Beloborodov ^g, Chumaevskii Andrey ^h, Ivanov Alexey ⁱ

Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 2/4, pr. Akademicheskii, Tomsk, 634055, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0003-0348-1869>, rvy@ispms.tsc.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0001-8648-0743>, alexpl@ispms.ru,
^c <https://orcid.org/0000-0002-1984-9720>, clothoid@ispms.tsc.ru, ^d <https://orcid.org/0000-0001-8708-8540>, nikolaeva@ispms.tsc.ru,
^e <https://orcid.org/0000-0003-2225-8232>, amc@ispms.tsc.ru, ^f <https://orcid.org/0000-0002-4208-7584>, gusarova@ispms.ru,
^g <https://orcid.org/0000-0003-4609-1617>, vabel@ispms.tsc.ru, ^h <https://orcid.org/0000-0002-1983-4385>, tch7av@gmail.com,
ⁱ <https://orcid.org/0000-0001-8959-8499>, ivan@ispms.tsc.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 21 September 2022
 Revised: 04 October 2022
 Accepted: 03 November 2022
 Available online: 15 December 2022

Keywords:

Plasma cutting
 Titanium alloy Ti-1,5Al-1,0Mn
 Macrostructure
 Copper C1220
 Aluminum alloy AA2024
 Heat-affected zone
 Changes in the mechanical properties of the material
 Disturbance of the macrogeometry of the cut

Funding

The results were obtained in the framework of the Integrated Project "Establishment of production of high-tech equipment for adaptive high-precision plasma heavy cutting of non-ferrous metals for the metallurgical, aerospace and transport industries of the Russian Federation" (Agreement No. 075-11-2022-012 dated April 06, 2022) implemented by the ISPMS SB RAS at the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation as part of Decree of the Government of the Russian Federation No. 218 dated April 09, 2010.

Acknowledgements

Research were partially conducted at core facility "Structure, mechanical and physical properties of materials".

ABSTRACT

Introduction. An important area of research in the field of plasma metal cutting is obtaining a metal cut face characterized by minimal roughness and geometric deviations. It is also important to minimize changes in the structure of the metal under the cutting surface caused by the temperature effects of the plasma jet, including the formation of dross. The solution to the problem of obtaining a quality cut is to optimize the parameters of the cutting process. The plasma arc current and voltage, cutting height and cutting speed are considered to be the main parameters that determine cut quality. However, insufficient attention has been paid to the processes of plasma metal cutting of thicknesses above 20 mm due to the limitations associated with the operation conditions of plasma torches with direct polarity currents. Accordingly, for cutting large thicknesses, the use of a plasma torch operating on currents of reverse polarity seems promising. **The aim of this work** is to develop the technique of plasma cutting of copper, titanium and aluminum alloy sheets up to 40 mm thick using a plasma torch operating on currents of reverse polarity. **Results and discussion.** Investigations show that for cutting aluminum alloy (*Al* 90.9–94.7 %; *Cu* 3.8–4.9 %; *Mg* 1.2–1.8 %; *Mn* 0.3–0.9 %) and titanium alloy (*Ti* 94.33–97.5 %; *Al* 1.5–2.5 %; *Mn* 0.7–2.0 %) it is possible to regulate the cutting speed in a wide range, while for rolled copper (*Cu* ≥99.96 %) and aluminum alloy with thickness of 40 mm the range of cutting speed regulation is rather narrow. While for aluminum alloy due to excessive precipitation of alloying elements from the solid solution in the heat-affected zone decrease of microhardness is observed, for titanium alloy the microhardness growth due to material hardening is characteristic. Changing the cutting mode parameters allows receiving more homogeneous macrogeometry of a cutting surface, smaller depth of a zone of melting of a material and a heat-affected zone and smaller changes of mechanical properties of a material in a zone of a cut. For the titanium alloy, almost all of the cutting modes used are close to optimum. For alloy aluminum and copper the modes providing the best cutting quality in the considered range of parameters are determined. According to the results of the work it can be concluded that plasma cutting on reverse polarity currents is effective for cutting rolled products of large thicknesses, but the technique requires further development in order to improve the quality of the resulting cut.

For citation: Rubtsov V.E., Panfilov A.O., Knyazhev E.O., Nikolaeva A.V., Cheremnov A.M., Gusarova A.V., Beloborodov V.A., Chumaevskii A.V., Ivanov A.N. Development of plasma cutting technique for C1220 copper, AA2024 aluminum alloy, and Ti-1,5Al-1,0Mn titanium alloy using a plasma torch with reverse polarity. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2022, vol. 24, no. 4, pp. 33–52. DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.4-33-52.

*Corresponding author

Rubtsov Valery Evgenievich, Leading researcher
 Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch
 of Russian Academy of Sciences,
 2/4, pr. Akademicheskii,
 634055, Tomsk, Russian Federation
 Tel.: 8 (382) 228–68–63, e-mail: rvy@ispms.ru

References

1. Akkurt A. The effect of cutting process on surface microstructure and hardness of pure and Al 6061 aluminium alloy. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2015, vol. 18, iss. 3, pp. 303–308. DOI: 10.1016/j.jestch.2014.07.004.
2. Ilii S.M., Coteata M. Plasma arc cutting cost. *International Journal of Material Forming*, 2009, vol. 2, pp. 689–692. DOI: 10.1007/s12289-009-0588-4.
3. Patel P., Nakum B., Abhishek K., Rakesh Kumar V., Kumar A. Optimization of surface roughness in plasma arc cutting of AISID2 steel using TLBO. *Materials Today: Proceedings*, 2018, vol. 5, iss. 9 (3), pp. 18927–18932. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.06.242.
4. Bini R., Colosimo B.M., Kutlu A.E., Monno M. Experimental study of the features of the kerf generated by a 200A high tolerance plasma arc cutting system. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, vol. 196, iss. 1–3, pp. 345–355. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.05.061.
5. Hoult A.P., Pashby I.R., Chan K. Fine plasma cutting of advanced aerospace materials. *Journal of Materials Processing Technology*, 1995, vol. 48, iss. 1–4, pp. 825–831. DOI: 10.1016/0924-0136(94)01727-I.
6. Peko I., Nedic B., Djordjevic A., Dzunic D., Janković M., Veza I. Modeling of surface roughness in plasma jet cutting process of thick structural steel. *Tribology in Industry*, 2016, vol. 38, no. 4, pp. 522–529.
7. Andrés D., García T., Cicero S., Lacalle R., Álvarez J.A., Martín-Meizoso A., Aldazabal J., Bannister A., Klimpel A. Characterization of heat affected zones produced by thermal cutting processes by means of Small Punch tests. *Materials Characterization*, 2016, vol. 119, pp. 55–64. DOI: 10.1016/j.matchar.2016.07.017.
8. Gariboldi E., Previtali B. High tolerance plasma arc cutting of commercially pure titanium. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, vol. 160, iss. 1, pp. 77–89. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.04.366.
9. Nandan Sharma D., Ram Kumar J. Optimization of dross formation rate in plasma arc cutting process by response surface method. *Materials Today: Proceedings*, 2020, vol. 32, pt. 3, pp. 354–357. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.01.605.
10. Gostimirović M., Rodic D., Sekulić M., Aleksic A. An experimental analysis of cutting quality in plasma arc machining. *Advanced Technologies and Materials*, 2020, vol. 45, no. 1, pp. 1–8. DOI: 10.24867/ATM-2020-1-001.
11. Kechagias J., Petousis M., Vidakis N., Mastorakis N. Plasma arc cutting dimensional accuracy optimization employing the parameter design approach. *ITM Web of Conferences*, 2017, vol. 9, p. 03004. DOI: 10.1051/itmconf/20170903004.
12. Cinar Z., Asmael M., Zeeshan Q. Developments in plasma arc cutting (PAC) of steel alloys: a review. *Jurnal Kejuruteraan*, 2018, vol. 30, pp. 7–16. DOI: 10.17576/jkukm-2018-30(1)-02.
13. Kudrna L., Fries J., Merta M. Influences on plasma cutting quality on CNC machine. *Multidisciplinary Aspects of Production Engineering*, 2019, vol. 2, pp. 108–117. DOI: 10.2478/mape-2019-0011.
14. Anakhov S., Guzanov B., Matushkin A., Pugacheva N., Pyckin Yu. Vliyanie konstruktivnykh osobennostei plazmotrona na kachestvo reza pri pretsizionnoivozdušno-plazmennoi razdelke metalla [Influence of plasma torch design on cutting quality during precision air-plasma cutting of metal]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 2020, vol. 63, no. 2, pp. 155–162. DOI: 10.17073/0368-0797-2020-2-155-162.
15. Peko I., Marić D., Nedić B., Samardžić I. Modeling and optimization of cut quality responses in plasma jet cutting of aluminium alloy EN AW-5083. *Materials*, 2021, vol. 14, iss. 19, p. 5559. DOI: 10.3390/ma14195559.
16. Salonitis K., Vatousianos S. Experimental investigation of the plasma arc cutting process. *Procedia CIRP*, 2012, vol. 3, pp. 287–292. DOI: 10.1016/j.procir.2012.07.050.
17. Suresh A., Diwakar G. Optimization of process parameters in plasma arc cutting for TWIP steel plates. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 38, pt. 5, pp. 2417–2424. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.07.383.
18. Nemchinsky V. Erosion of thermionic cathodes in welding and plasma arc cutting systems. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2014, vol. 42, no. 1, pp. 199–215. DOI: 10.1109/TPS.2013.2287794.
19. Matushkina I., Anakhov S., Pyckin Yu. Design of a new gas-dynamic stabilization system for a metal-cutting plasma torch. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 2094, p. 042075. DOI: 10.1088/1742-6596/2094/4/042075.
20. Shchitsyn V.Yu., Yazovskikh V.M. Effect of polarity on the heat input into the nozzle of a plasma torch. *Welding International*, 2002, vol. 16 (6), pp. 485–487. DOI: 10.1080/09507110209549563.

21. Shicin Y.D., Belinin D.S., Kuchev P.S., Neulybin S.D. Osobennosti teploperedachi v izdelie pri rabote plazmotrona na toke obratnoi polyarnosti [Features of heat transfer to the product when working on the plasma torch current of reversed polarity]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie = Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2014, vol. 16, no. 2, pp. 42–50. DOI: 10.15593/v16i2.3275.

22. Shitsyn Y.D., Shitsyn V.Y., Neulybin S.D., Nikulin R.G., Nikulina S.G., Karunakarah K.P. Issledovanie raboty anodov dugovykh plazmotronov dlya raboty na obratnoi polyarnosti toka [Investigation of the operation of the anodes of arc plasmatrons for operation on reverse polarity of current]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie = Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2020, vol. 22, no. 3, pp. 60–67. DOI: 10.15593/2224-9877/2020.3.08.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2022 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).