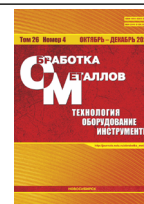




Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Искажение геометрии, окисление кромки, структурные изменения и морфология поверхности реза листового проката толщиной 100 мм из алюминиевых, медных и титановых сплавов при плазменной резке на токе обратной полярности

Артем Гриненко ^{1, a}, Андрей Чумаевский ^{2, b, *}, Евгений Сидоров ^{2, c}, Вероника Утяганова ^{2, d},
Алихан Амиров ^{2, e}, Евгений Колубаев ^{2, f}

¹ ООО «ИТС-Сибирь», Красноярск, Северное шоссе, 16а, 660118, Россия

² Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Академический проспект, 2/4, Томск, 634055, Россия

^a  <https://orcid.org/0009-0002-9511-1303>,  giga2011@yandex.ru; ^b  <https://orcid.org/0000-0002-1983-4385>,  tch7av@gmail.com;

^c  <https://orcid.org/0009-0009-2665-7514>,  eas@ispms.ru; ^d  <https://orcid.org/0000-0002-2303-8015>,  veronika_ru@ispms.ru;

^e  <https://orcid.org/0000-0002-5143-8235>,  amir@ispms.tsc.ru; ^f  <https://orcid.org/0000-0001-7288-3656>,  eak@ispms.tsc.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.791.14

История статьи:

Поступила: 17 сентября 2024
Рецензирование: 01 октября 2024
Принята к печати: 10 октября 2024
Доступно онлайн: 15 декабря 2024

Ключевые слова:

Плазменная резка
Макроструктура
Зона термического влияния
Плавнение металла
Параметры резки
Ток обратной полярности
Толстолистовой прокат

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 Минобрнауки № 13.ЦКП.21.0034) и ЦКП «НАНОТЕХ» ИФПМ СО РАН.

АННОТАЦИЯ

Во введении описана целесообразность применения плазменной резки на токе обратной полярности для получения крупногабаритных заготовок цветных металлов толщиной до 100 мм. Приведены данные по применению плазменной резки на токе прямой и обратной полярности толстолистового проката и по основным технологическим проблемам, связанным с ее осуществлением. **Цель работы:** исследование организации структуры и свойств приповерхностной зоны, а также изменений химической и фазового состава при резке алюминиевых, медных и титановых сплавов. **Методами исследования** являются оптическая и растровая электронная микроскопия, измерение микротвердости, рентгеноструктурный и энергодисперсионный анализ. Плазменную резку осуществляли при использовании в качестве плазмообразующего и защитного газа воздуха одновременно со впрыском воды в разрядную камеру и формированием вокруг плазменного столба «водяного тумана». **Результаты и обсуждение.** Показано, что при плазменной резке листового проката на токе обратной полярности большое значение имеет как стабильность горения дуги, так и форма плазменного столба. Искажение геометрии реза при работе в штатном режиме максимально в центральной части, а при недостаточном тепловложении смещается в нижнюю часть и значительно возрастает. Работа плазматрона на воздухе не приводит к существенным изменениям состава поверхности реза алюминиевого и медного сплавов. Для алюминийсодержащего сплава в поверхностных слоях характерно снижение содержания магния вблизи кромки. Резка титанового сплава сопровождается интенсивным окислением поверхности, особенно в областях затрудненного вытеснения металла из полости реза. Формирование оксидов титана, преимущественно рутила Ti_2O_3 , резко повышает значения микротвердости в поверхностных слоях, что негативно влияет на обрабатываемость кромки реза и требует проведения дробеструйной обработки для удаления оксидного слоя. **В заключении** описаны основные закономерности реализации плазменной резки на токе обратной полярности листового проката алюминиевых, медных и титановых сплавов толщиной 100 мм.

Для цитирования: Искажение геометрии, окисление кромки, структурные изменения и морфология поверхности реза листового проката толщиной 100 мм из алюминиевых, медных и титановых сплавов при плазменной резке на токе обратной полярности / А.В. Гриненко, А.В. Чумаевский, Е.А. Сидоров, В.Р. Утяганова, А.И. Амиров, Е.А. Колубаев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2024. – Т. 26, № 4. – С. 41–56. – DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-41-56.

*Адрес для переписки

Чумаевский Андрей Валерьевич, д.т.н., в.н.с.
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
Академический проспект, 2/4,
634055, Томск, Россия
Тел.: 8 (382) 228-68-63, e-mail: tch7av@ispms.ru

Введение

В настоящее время перед отечественной промышленностью остро стоит задача, связанная с высокопроизводительным производством заготовок из цветных металлов и сплавов для изготовления крупногабаритных изделий и конструкций. Газопламенная и гидроабразивная резка позволяют резать толстолистовой прокат, но обладают низкой производительностью [1–3]. Лазерная резка имеет высокую производительность, но не позволяет получать заготовки большой толщины [4, 5]. Применяемые виды механической резки металлов не обладают нужной гибкостью для производства изделий сложной формы.

Одновременно высокой производительностью и возможностью получать заготовки из толстолистового проката обладает плазменная резка [6–8]. Этот метод хорошо подходит как для сталей и черных металлов [9, 10], так и для медных, алюминиевых и титановых сплавов [11–16]. Плазменной резкой возможно получение заготовок из толстолистового проката, в том числе толщиной 100 мм и более. Однако резка заготовок такой толщины при использовании плазматронов, работающих на токе прямой полярности, является достаточно затруднительной и сопровождается значительным износом рабочих элементов [17, 18]. К тому же основные имеющиеся на рынке плазматроны данного типа зарубежного производства и не выпускаются отечественными предприятиями. В связи с этим требуется разработка альтернативных существующим средств плазменной резки отечественного производства. Для этих целей в настоящее время в рамках совместного проекта ИФПМ СО РАН и ООО «ИТС-Сибирь» происходит разработка оборудования для плазменной резки толстолистового проката цветных металлов и сплавов больших толщин на токе обратной полярности [13–16, 18, 19].

Резка на токе обратной полярности обладает рядом преимуществ в сравнении с прямой полярностью. В первую очередь снижается расход сопел и электродов, входящих в состав плазматронов [17, 18]. Вторым, но не менее важным фактором, является увеличение возможной к резке толщины листового проката [15]. Плазменная резка на токе обратной полярности обла-

дает большей производительностью при равной мощности в сравнении с прямой полярностью [18, 20–23]. Дополнительно повышается качество поверхности реза и снижается степень структурных изменений от термического воздействия [18]. В то же время плазменная резка более сложна и по отработке режимов [13–16], и по характерным особенностям деградации и износа рабочих элементов плазмотрона [18].

Несмотря на достаточно длительное время использования плазменной резки, в современной литературе практически отсутствует информация о влиянии процесса резки на структуру и качество поверхности реза листового проката толщиной 100 мм и более при использовании плазматронов, работающих на токе обратной полярности.

Целью настоящей работы является изучение организации структуры, искажения кромки, изменения химического и фазового состава при плазменной резке на токе обратной полярности алюминиевых, медных и титановых сплавов.

Методика исследований

Экспериментальные исследования проводились на производственном участке в ООО «ИТС-Сибирь» и на экспериментальном оборудовании в ИФПМ СО РАН. Процесс резки выполнялся на плазмотроне с обратной полярностью, разрабатываемом в процессе проведения совместного научно-технического проекта. В качестве материала использовали плиты толщиной 100 мм из алюминиевого сплава АМг6, бронзы БрАМц9-2 и титанового сплава ВТ22 в состоянии поставки. Схема работы плазмотрона и процесса плазменной резки приведена на рис. 1, а.

Резку плит 1 толщиной 100 мм производили плазменной струей 2, формируемой в среде защитного газа 3 за счет горения пусковой дуги 4 на старте процесса и рабочей дуги 5 непосредственно на рабочем режиме. Подачу защитного и плазмообразующего газа 6 в зону резки производили при фиксированном давлении в системе. Сопло 7 фиксировали гайкой 8. В сопле происходило формирование плотной вихревой струи газа и плазмы 9, образующейся за счет завихрителя 10 и горения дуги. Дополнительно на плазмотроне разрабатываемой конструкции производили впрыск воды 11 в разрядную ка-

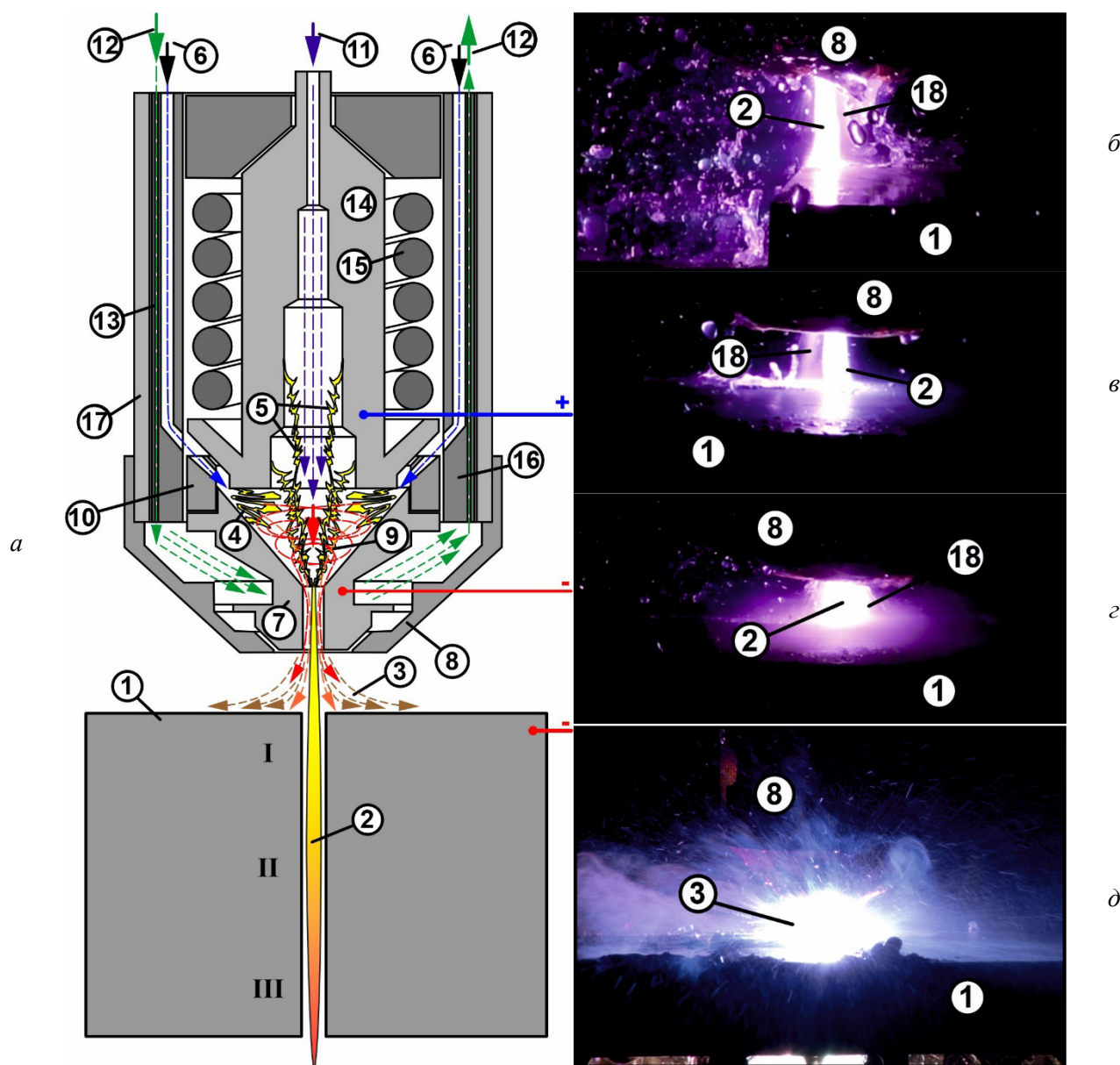


Рис. 1. Схема работы плазматрона на токе обратной полярности (а); внешний вид плазменной струи на старте (б) и в рабочем режиме (в); повышение плотности «водяного тумана» вокруг плазменной струи при работе (г); внешний вид зоны резки (д):

1 – плита; 2 – плазменная струя; 3 – поток газа; 4 – пусковая дуга; 5 – рабочая дуга; 6 – поток плазмообразующего и защитного газа; 7 – сопло; 8 – внешняя гайка; 9 – вихревые потоки газа и плазмы; 10 – завихритель; 11 – подача воды в полый электрод; 12 – подача охлаждающей воды в корпус плазматрона; 13 – каналы водяного охлаждения; 14 – электрод; 15 – соленоид; 16 – внутренний корпус из фторопласта; 17 – внешний стальной корпус; 18 – «водяной туман»

Fig. 1. Scheme of the reverse polarity plasma torch operation (a); the appearance of the plasma jet at start (б) and in the operating mode (в); an increase in the density of the “water mist” around the plasma jet (г); and the appearance of the cutting zone (д):

1 – plate; 2 – plasma jet; 3 – gas flow; 4 – starting arc; 5 – working arc; 6 – flow of plasma-forming and protective gas; 7 – nozzle; 8 – external nut; 9 – vortex flows of gas and plasma; 10 – swirler; 11 – water supply to the hollow electrode; 12 – supply of cooling water to the plasma torch body; 13 – water cooling channels; 14 – electrode; 15 – solenoid; 16 – inner casing made of PTFE; 17 – outer steel casing; 18 – “water mist”

меру через отверстие в рабочем электроде 14. Такое положение требовалось для повышения качества реза и снижения износа сопла и электрода [16, 18, 19]. Во избежание перегрева сопла и электрода обеспечивали постоянный поток воды 12 через каналы в корпусе 13. За счет особенностей конструкции плазмотрона поток 13 сначала проходил через сопло и электрод, потом частично на выход из корпуса, а частично в разрядную камеру. Подвод тока к электроду осуществляли через медный соленоид 15, дополнительно формирующий магнитное поле для фокусирования потока плазмы и электрической дуги. Внутренний корпус плазмотрона 16 с каналами подачи воды и воздуха изготовлен из фторопласта, а внешний корпус 17 – из стали. Рабочий электрод 14 и сопло 7 изготовлены из меди марки М1.

На старте процесса расстояние между плазмотроном и плитой увеличивали (рис. 1, б), а после стабилизации процесса горения дуги снижали (рис. 1, в). При резке «водяной туман» вокруг плазменной струи значительно изменялся за счет пульсации давления в разрядной камере (рис. 1, в, г). Вокруг зоны реза формировалось большое количество продуктов горения металла, вытесняемых потоком защитного газа (рис. 1, д). Ток электрической дуги при резке составлял от 350 до 370 А, напряжение – от 370 до 400 В, высота плазмотрона над поверхностью плиты при резке – от 16 до 25 мм. Давление газа составляло от 2,0 до 4,0 бар, давление воды в системе до входа в контур охлаждения плазмотрона – 6 бар, зазор между соплом и электродом – от 0,5 до 2,0 мм. Скорость резки – от 250 до 3000 мм/мин. В качестве плазмообразующего и защитного газа использовали воздух.

После получения экспериментальных образцов из них электроэрозионным методом (на станке DK7750) производили вырезку металлографических шлифов для структурных исследований. Исследования структуры и морфологии поверхности реза производили на оптическом микроскопе «Альтами МЕТ 1С», лазерном сканирующем микроскопе Olympus LEXT 4100 и растровом электронном микроскопе Zeiss LEO EVO 50, совмещенном с системой для микро-рентгеноспектрального анализа. Искажение геометрии реза определяли по максимальному отклонению поверхности реза от перпендику-

лярности с помощью макроструктурных изображений, полученных методом оптической микроскопии.

Результаты и их обсуждение

В ходе плазменной резки плит толщиной 100 мм формировалась специфическая структура вблизи поверхности реза и характерный для плазменной резки макрорельеф (рис. 2). На поверхности реза алюминиевого сплава и бронзы присутствует большое количество следов течения металла по поверхности кромки в процессе резки (рис. 2, а, в). Поверхность реза титанового сплава не проявляет настолько выраженных следов течения металла и характеризуется наличием микротрещин (рис. 2, д).

Наиболее выражено искажение кромки реза алюминиевого и медного сплавов в центральной части (II на рис. 2, б, г), для титанового сплава – в нижней части кромки (III на рис. 2, д). Наиболее грубый рельеф для образцов всех сплавов наблюдается в нижней части пластины (III), а наиболее однородной является верхняя часть реза (I). В структуре приповерхностной зоны образцов всех трех типов можно выделить области оплавленного металла, зону термического влияния и основной металл с неизменной структурой. Наименее подвержена термическому воздействию структура бронзы БрАМц9-2, наибольшая величина зоны термического влияния отмечается для сплава ВТ22, а для сплава АМгб характерна большая толщина зоны оплавленного металла. Как будет показано далее, такое положение обусловлено термическими условиями, составом сплавов, их температурой плавления и теплопроводностью.

Поверхность алюминиевого сплава АМгб после резки проявляет различное строение в верхней, центральной и нижней частях реза (рис. 3, а–в). Более равномерной является верхняя часть, а в нижней содержится большее количество пор и следов окисления. При исследовании микроструктуры выявляется формирование микротрещин (1 на рис. 3, г) и мелких пор сферической формы (2 на рис. 3, г). По данным энергодисперсионного анализа (ЭДС), в поверхностных слоях присутствует достаточно большое количество кислорода. В структуре поверхностного слоя (рис. 4, а–д) выделяются

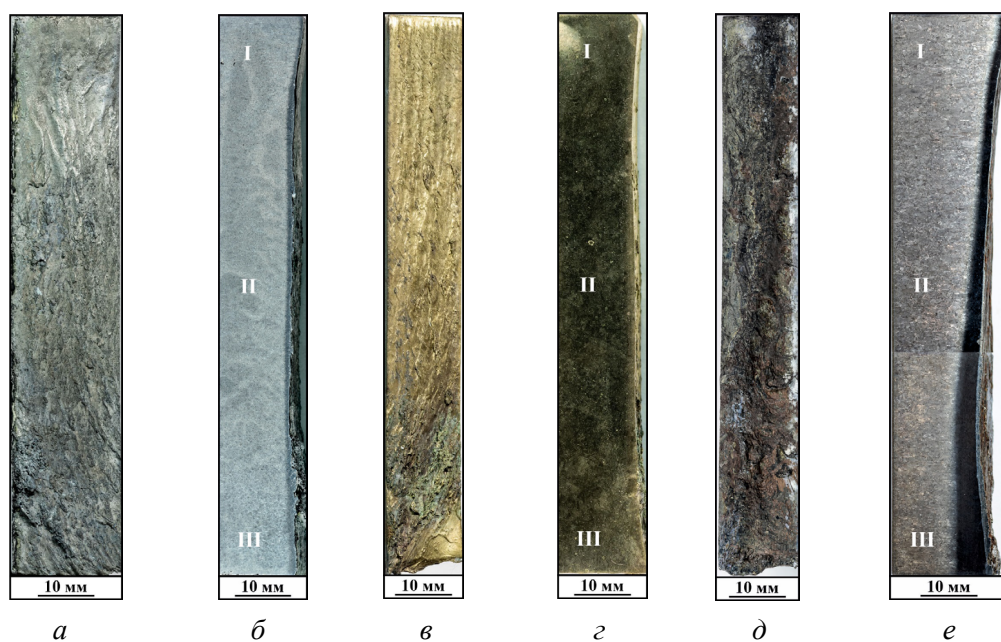


Рис. 2. Поверхность реза (а, в, д) и макроструктура в поперечном сечении (б, з, е) образцов алюминиевого сплава АМг6 (а, б), бронзы БрАМц9-2 (в, з) и титанового сплава ВТ22 (д, е) после плазменной резки на токе обратной полярности

Fig. 2. The cut surface (а, в, д) and the macrostructure in the cross section (б, з, е) of specimens of aluminum alloy *Al-6 Mg* (а, б), bronze *Cu-9 Al-2 Mn* (в, з) and titanium alloy *Ti-5 Al-5 Mo-5 V* (д, е) after reverse polarity plasma cutting

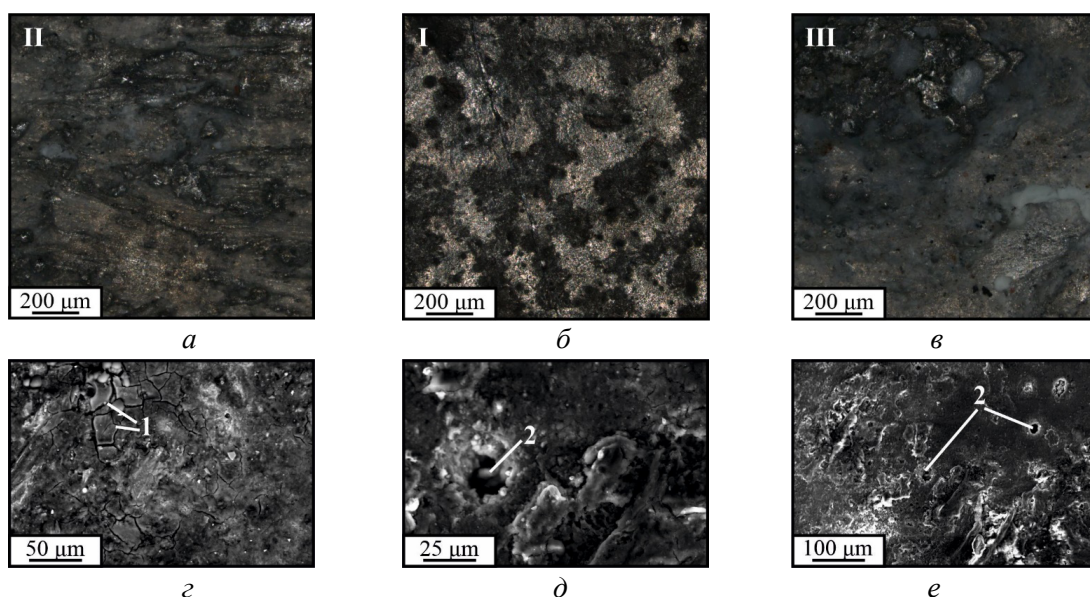


Рис. 3. Изображения поверхности реза алюминиевого сплава АМг6, полученные методом лазерной сканирующей (а–в) и растровой электронной микроскопии (г–е)

Fig. 3. Images of the cut surface of aluminum alloy *Al-6 Mg* obtained by laser scanning (а–в) and scanning electron (г–е) microscopy

зона плавления (ЗП), зона термического влияния (ЗТВ) и основной металл (ОМ). Глубина ЗТВ и ОМ преимущественно не превышает 1 мм в центральной части. Зона плавления содержит большое количество крупных частиц вторичных фаз (1 на рис. 4, з), пор (2 на рис. 4, е, ж) и не-

сплошностей (3 на рис. 4, ж). По данным ЭДС-анализа, в зоне плавления содержится лишь небольшое количество кислорода, но значительно изменяется содержание магния, что представлено на рис. 5, б. Выгорание магния для сплавов типа АМг6 является ожидаемым и наблюдается

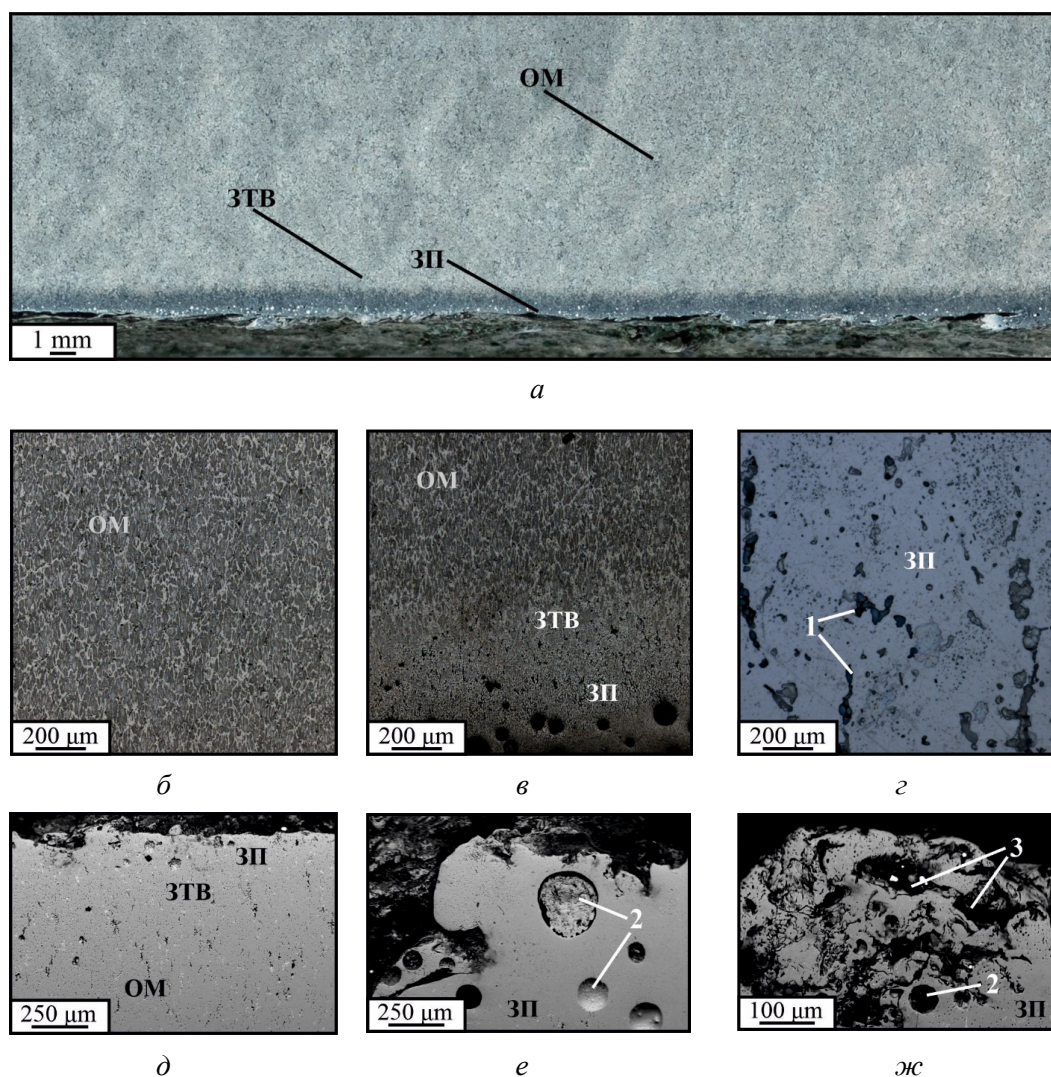


Рис. 4. Макроструктура (а); изображения микроструктуры, полученные методами оптической микроскопии (б–г) и растровой электронной микроскопии (д–ж), образца алюминиевого сплава АМг6

Fig. 4. Macrostructure (a), images of the microstructure obtained by optical (б–г) and scanning electron (д–ж) microscopy of a specimen of aluminum alloy Al-6 Mg

в том числе и при сварке различными методами. По данным рентгеноструктурного анализа (РСА), в поверхностных слоях изменения фазового состава не происходит, структура представлена Al(Mg) (рис. 5, в, г).

Из-за снятия наклепа и выгорания магния в поверхностных слоях алюминиевого сплава происходит достаточно значительное снижение микротвердости, особенно в нижней части реза (рис. 5, а). Причем если в верхней части реза микротвердость уменьшается с 1,21 ГПа в основном металле до 1,01 ГПа в приповерхностной зоне, то в нижней части реза вблизи поверхности она составляет примерно 0,94 ГПа. В верхней и центральной частях реза на глубине 1,0 мм микротвердость уже достигает значений

основного металла, а в нижней части составляет 1,05 ГПа. Это показывает намного большее термическое влияние на материал в нижней части зоны реза, что обусловлено вытеснением всего расплавленного в полости реза металла через данную область и затруднением его выведения струей защитного газа. В целом ориентируясь на допуски размеров для производства заготовок из плит данной толщины, можно считать и искажение реза, и структурные изменения в нем приемлемыми.

На поверхности бронзы БрАМц9-2 после резки рельеф также существенно отличается в верхней, нижней и центральной частях зоны реза (рис. 6, а–в). Выделяются элементы, сформированные при быстром застывании металла,

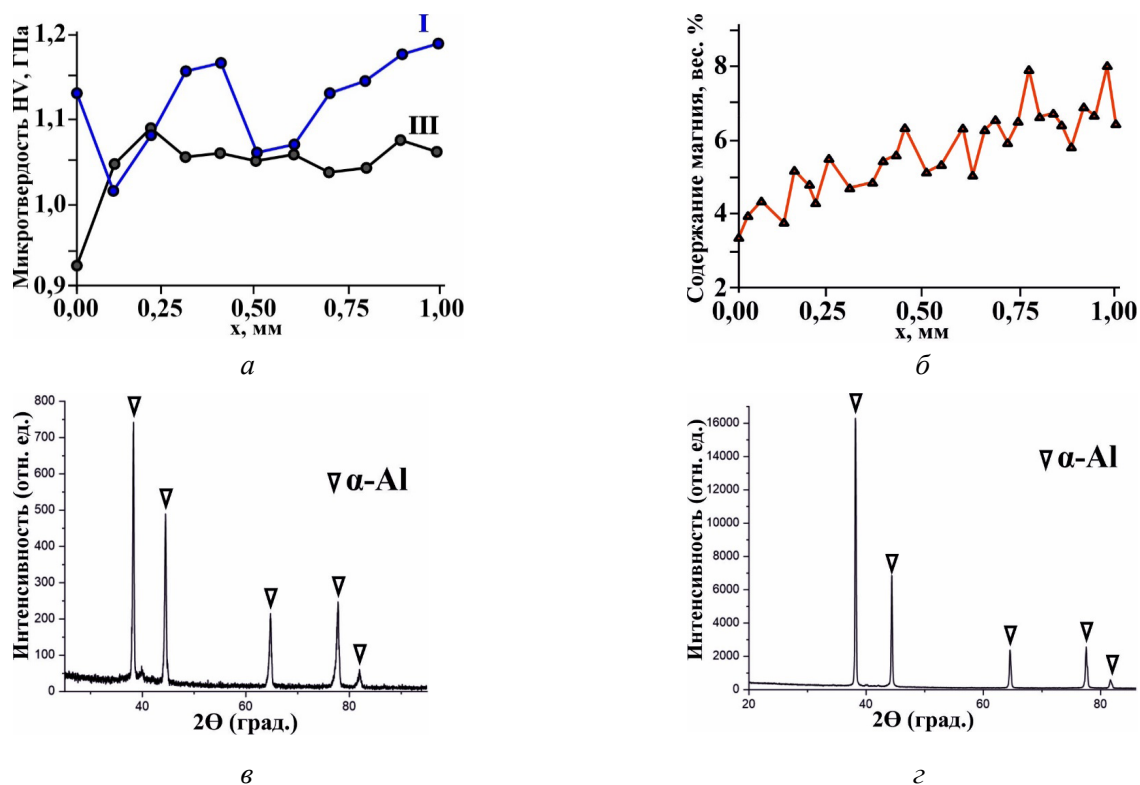


Рис. 5. Микротвердость (*a*); изменение содержания магния (*б*) в поверхностных слоях алюминиевого сплава АМг6; результаты рентгеновского анализа основного металла (*в*) и поверхности реза (*г*)

Fig. 5. Microhardness (*a*), change in magnesium content (*б*) in the surface layers of aluminum alloy Al-6 Mg and the results of X-ray analysis of the base metal (*в*) and the cut surface (*г*)

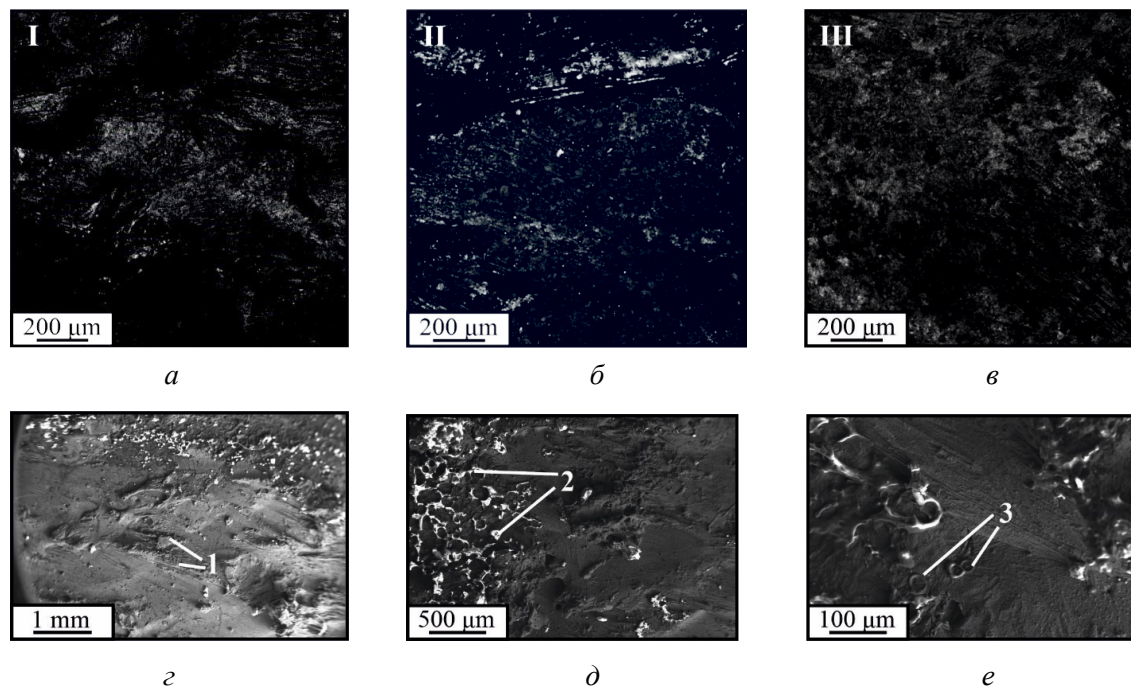


Рис. 6. Изображения поверхности реза бронзы БрАМц9-2, полученные методом лазерной сканирующей микроскопии (*a–в*) и растровой электронной микроскопии (*г–е*)

Fig. 6. Images of the cut surface bronze Cu-9 Al-2 Mn obtained by laser scanning (*a–в*) and scanning electron (*г–е*) microscopy

стекающего по поверхности кромки при резке (1 на рис. 6, з). По данным РЭМ и РСА, также присутствуют фрагменты оксидов (2 на рис. 6, д) и образования в виде пор или «кратеров» (3 на рис. 6, е). Окисление поверхности при этом фрагментарно и сплошного окисленного слоя не образуется.

В структуре поверхностного слоя также выделяются зона плавления, зона термического влияния и основной металл (рис. 7, а–г). В материале данных зон присутствуют поры (1 на рис. 7, д) и несплошности (2 на рис. 7, ж). Однако зона оплавленного металла при этом значительно меньше и в центральной части не превышает по толщине 100...200 мкм, а зона термического

влияния выделяется достаточно слабо (рис. 7, а–г, рис. 8, а). Значения микротвердости в поверхностных слоях практически не изменяются, что обусловлено высокой теплопроводностью материала и быстрым охлаждением. По этой причине, согласно данным РСА, в материале не происходит качественных изменений фазового состава (рис. 8, б, в). Основной фазой является твердый раствор $\text{Cu}(\text{Al})$ и β' -фаза (игольчатая Cu_3Al между зернами твердого раствора). В зоне плавления и термического влияния можно выделить только изменения объемной доли и содержания данных фаз (рис. 7, в, е). Присутствуют также вторичные фазы в виде частиц Cu_3Al по всему объему материала. Высокая теплопроводность материала

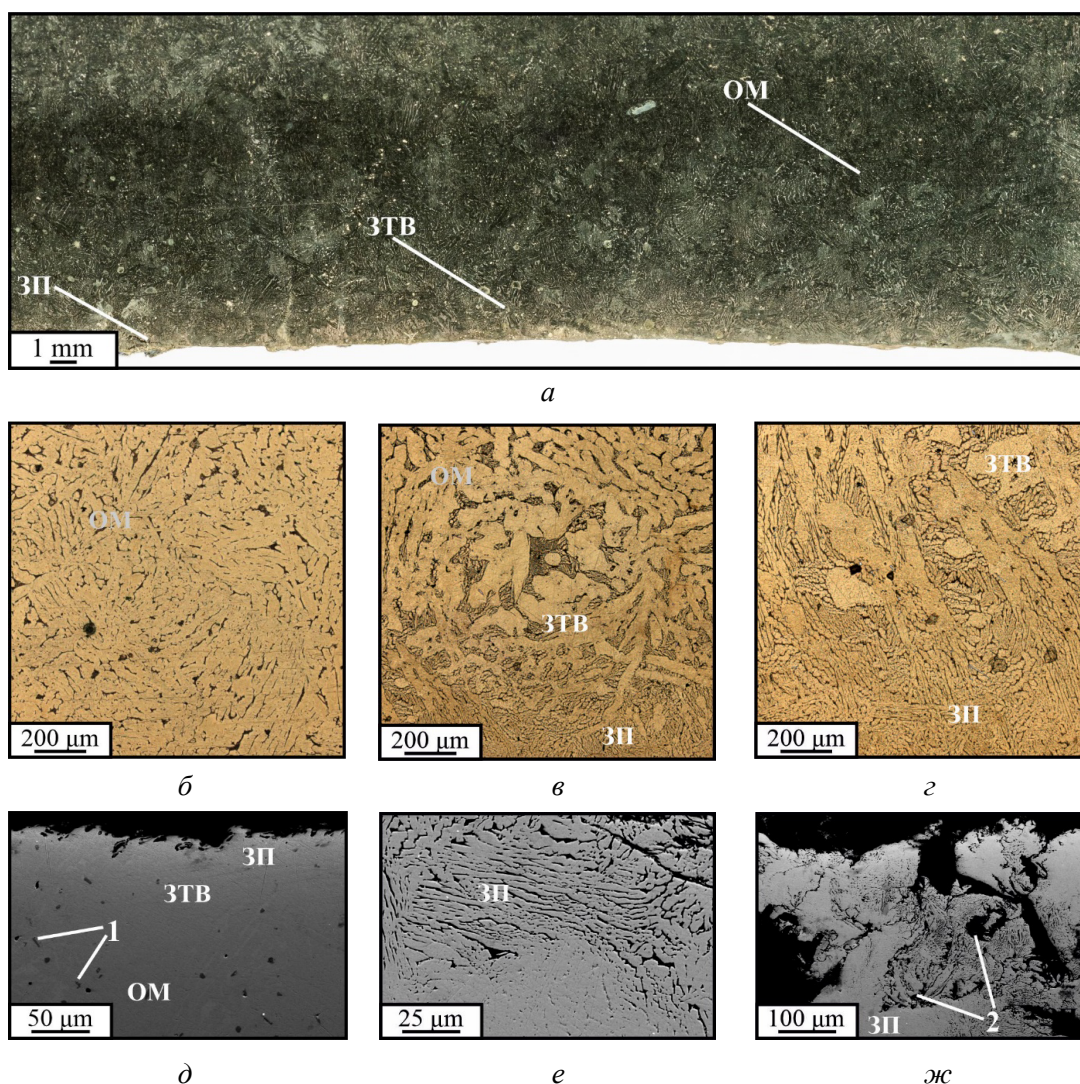


Рис. 7. Макроструктура (а); изображения микроструктуры, полученные методами оптической микроскопии (б–г) и растровой электронной микроскопии (д–ж), образца бронзы БрАмц9-2

Fig. 7. Macrostructure (а), images of the microstructure obtained by optical (б–г) and scanning electron (д–ж) microscopy of a specimen of bronze Cu-9 Al-2 Mn

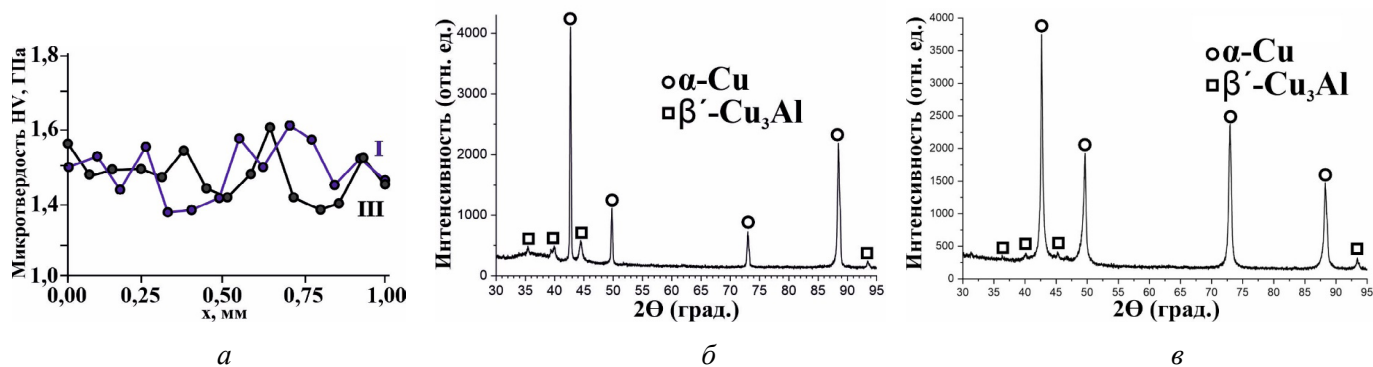


Рис. 8. Изменение микротвердости (а) в поверхностных слоях бронзы БрАМц9-2; результаты рентгеновского анализа основного металла (б) и поверхности реза (в)

Fig. 8. Change in microhardness in the surface layers of bronze *Cu-9 Al-2 Mn* (а); the results of X-ray analysis of the base metal (б) and the cut surface (в)

обуславливает меньшие структурные изменения в приповерхностной зоне, чем у алюминиевого сплава, но и большую долю не вытесненного из зоны реза материала в нижней части реза, что показано на рис. 2, в. В целом по анализу искажения геометрии и структурных изменений материала для плит данного размера качество реза можно считать приемлемым.

Морфология поверхности реза титанового сплава BT22 в верхней, нижней и центральной частях достаточно близка (рис. 9, а–в). Поверхностный рельеф в данном случае (в отличие от

медного и алюминиевого сплавов) слабо выявляет следы течения металла по контуру инструмента, хотя и имеются близкие по форме выступы в центральной части реза (1 на рис. 9, з). Основной причиной существенных отличий морфологии реза титанового сплава является окисление поверхности с формированием сплошного оксидного слоя, что подтверждается данными РЭМ и ЭДС-анализа (рис. 9, д, е). Основной вид оксида, по данным ЭДС и РСА-анализа, – Ti_2O (рис. 11, з). На поверхности слоя можно отметить наличие структур дендритного

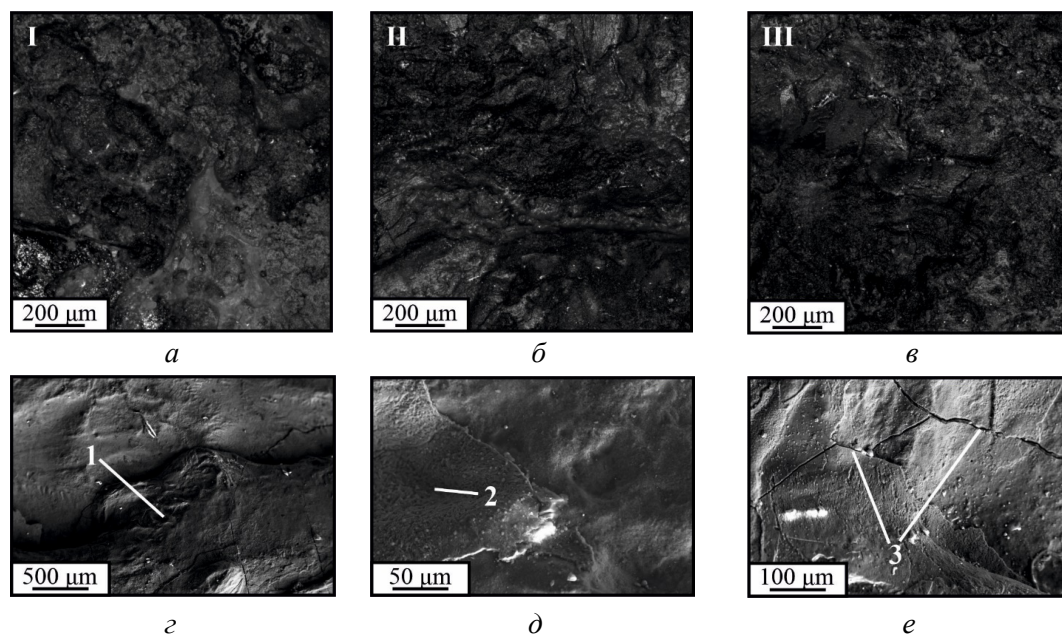


Рис. 9. Изображения поверхности реза титанового сплава BT22, полученные методом лазерной сканирующей микроскопии (а–в) и растровой электронной микроскопии (г–е)

Fig. 9. Images of the cut surface of titanium alloy *Ti-5 Al-5 Mo-5 V* obtained by laser scanning (а–в) and scanning electron (г–е) microscopy

типа, возникших при кристаллизации оксида (2 на рис. 9, *д*) и микротрещин (3 на рис. 9, *е*), формирование которых происходило при остывании материала после резки. Анализ структуры и химического состава материала показывает, что зона плавления подвержена окислению практически на всю глубину (рис. 10, *а*, рис. 11, *б*) вплоть до 0,5 мм в нижней части реза.

Металл в зоне резки также представлен зоной плавления, зоной термического влияния и основным металлом (рис. 10, *а–г*). В зоне плавления оксиды и титан формируют дендритные структуры. Зона основного металла и зона термического влияния представлены пластинами альфа- и бета-фазы, что подтверждается и оптической микроскопией (рис. 10, *б, в*), и данными РСА-анализа (рис. 11, *в, г*). Зона плавления содержит достаточно крупные трещины, практически на всю глубину (1 на рис. 10, *д*).

Вблизи поверхности в зоне плавления можно выделить наличие выступов (2 на рис. 10, *е*) и несплошностей (3 на рис. 10, *ж*). Из-за окисления материала в приповерхностных слоях выделяется резкий рост микротвердости (рис. 11, *а*). Наибольшее увеличение микротвердости вплоть до 8 ГПа происходит в нижней части зоны резки, глубина зоны составляет в данном случае более 1 мм. В верхней части реза и термическое влияние на материал, и окисление кромки значительно меньше, и глубина данных зон не превышает 0,3 мм.

Окисление материала титанового сплава в поверхностных слоях более существенное, чем для алюминиевого сплава, это обусловлено более высокой активностью титана и температурой плавления. В нижней части зоны реза при установленной мощности плазмообразующей дуги полное прохождение струей плазмы плиты

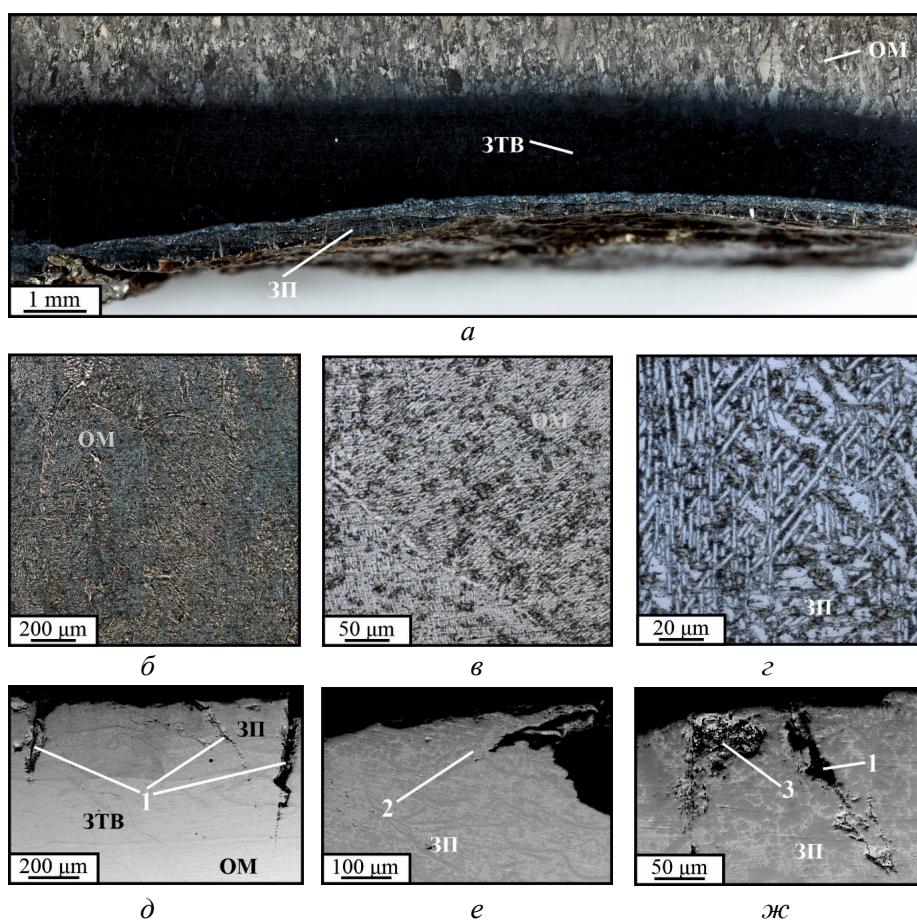


Рис. 10. Макроструктура (*а*) и изображения микроструктуры, полученные методами оптической микроскопии (*б–г*) и растровой электронной микроскопии (*д–ж*), образца титанового сплава BT22

Fig. 10. Macrostructure (*a*), images of the microstructure obtained by optical (*б–г*) and scanning electron (*д–ж*) microscopy of a specimen of titanium alloy Ti-5 Al-5 Mo-5 V

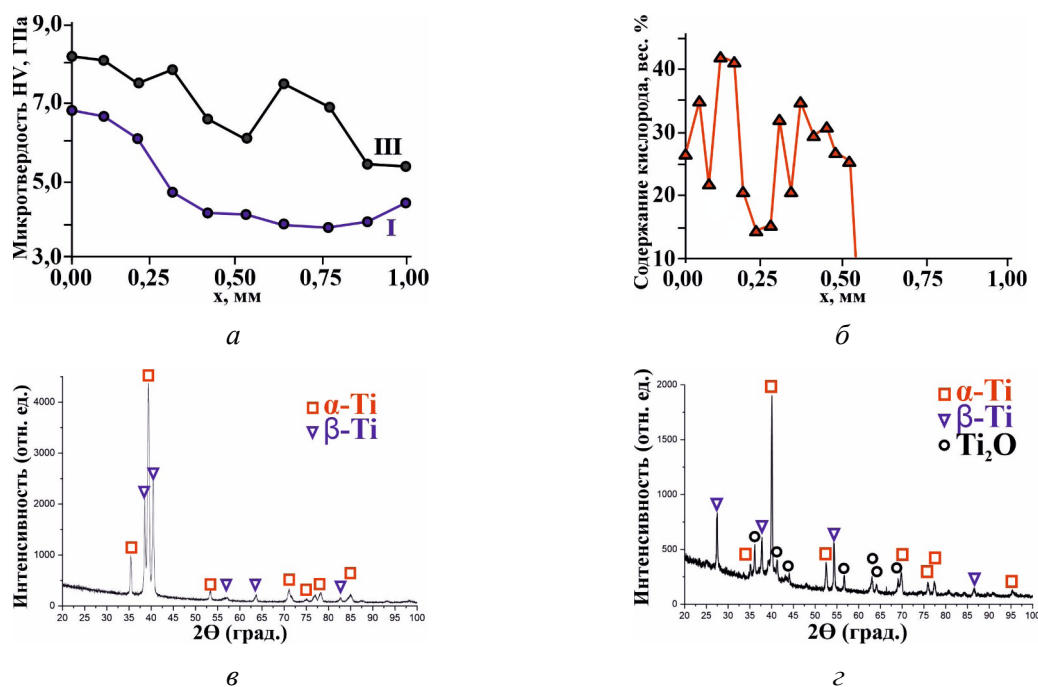


Рис. 11. Микротвердость (а); изменение содержания кислорода (б) в поверхностных слоях титанового сплава VT22; результаты рентгеновского анализа основного металла (в) и поверхности реза (г)

Fig. 11. Microhardness (а), change in oxygen content (б) in the surface layers of titanium alloy *Ti-5Al-5Mo-5V*, the results of X-ray analysis of the base metal (в) and the cut surface (г)

было затруднено, и на материал оказывалось более длительное термическое воздействие.

Можно установить, что рез в данном случае формировался на пределе возможности, на грани полного прорезания плиты и дефекта в виде непрореза. Это привело к более существенному окислению кромки в нижней части и ухудшению качества реза. В целом для механической обработки резанием заготовок титанового сплава это неприемлемо, и после плазменной резки требуется проведение дробеструйной обработки для удаления окалины. Возможно также использование азота в качестве защитного и плазмообразующего газа при резке, но для плит данной толщины характерно медленное остывание кромки, особенно для титанового сплава с достаточно низкой теплопроводностью, поэтому окисления кромки при недостаточном вытеснении металла из полости реза и избыточном оплавлении поверхности избежать не удастся. Однако повышение мощности источника плазмообразующей дуги и резка на несколько большем (400 А) токе могут позволить формировать рез на плите титанового сплава толщиной 100 мм приемлемого качества, в том числе и при использовании воздуха для плазмообразующего газа.

Заключение

Проведенные исследования показывают, что методом плазменной резки на токе обратной полярности возможно получение заготовок толщиной 100 мм из листового проката алюминиевых, медных и титановых сплавов. Наилучшее качество поверхности реза характерно для плит алюминиевого сплава АМгб и бронзы БрАМц9-2. Для этих сплавов отмечаются небольшие изменения механических свойств и структуры в поверхностных слоях и невысокие значения искажений геометрии реза. Величина зоны со сниженным содержанием магния в алюминиевом сплаве не превышает 0,5 мм от поверхности реза, а в бронзе практически не происходит изменений химического состава. Для обоих сплавов характерно наличие кислорода только на поверхности реза без формирования слоя окислов. Качество реза титанового сплава VT22 значительно снижается. Из-за большей температуры плавления прорезание на всю глубину плиты несколько осложнено, и в нижней части плиты можно отметить значительное искажение кромки. На поверхности формируется достаточно крупный слой из окислов, внутри которого при остывании образуются

микротрещины. Это обуславливает требования к предварительной дробеструйной постобработке титанового сплава после резки с использованием плазмообразующего газа в виде воздуха или замена его азотом. Можно также отметить, что в верхней части зоны реза с оптимальными условиями вытеснения металла из полости реза оксидный слой достаточно невелик. Резка на воздухе с дополнительным впрыском воды для титанового сплава также может использоваться, но требует, предположительно, более высокой мощности дуги и давления газа.

Список литературы

1. A virtual sensing approach for quality and productivity optimization in laser flame cutting / N. Levichev, A. Tomás García, R. Dewil, J.R. Dufflou // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2022. – Vol. 121. – P. 6799–6810. – DOI: 10.1007/s00170-022-09750-8.
2. Influence of the parameters of chemical thermal treatment of copper slag particles on the quality of hydroabrasive cutting / G.V. Barsukov, M.F. Selemeney, T.A. Zhuravleva, I.N. Kravchenko, E.M. Selemeneyeva, O.V. Barmina // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. – 2023. – Vol. 52. – P. 679–686. – DOI: 10.1134/S1052618823070075.
3. Barsukov G., Zhuravleva T., Kozhus O. Quality of hydroabrasive waterjet cutting machinability // *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 206. – P. 1034–1038. – DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.590.
4. Optimizing process parameters of in-situ laser assisted cutting of glass-ceramic by applying hybrid machine learning models / J. Wei, W. He, C. Lin, J. Zhang, J. Chen, J. Xiao, J. Xu // *Advanced Engineering Informatics*. – 2024. – Vol. 62. – P. 102590. – DOI: 10.1016/j.aei.2024.102590.
5. Laser cutting of aluminum alloys using pulsed radiation from a CO₂ laser under conditions of an optical discharge in an argon jet / V.B. Shulyat'ev, M.A. Gulov, E.V. Karpov, A.G. Malikov, K.R. Boiko // *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*. – 2023. – Vol. 50. – P. S1075–S1078. – DOI: 10.3103/S1068335623220116.
6. Electrical arc contour cutting based on a compound arc breaking mechanism / G.-J. He, L. Gu, Y.-M. Zhu, J.-P. Chen, W.-S. Zhao, K.P. Rajurkar // *Advances in Manufacturing*. – 2022. – Vol. 10 (4). – P. 583–595. – DOI: 10.1007/s40436-022-00406-0.
7. Sharma D.N., Kumar J.R. Optimization of dross formation rate in plasma arc cutting process by response surface method // *Materials Today: Proceedings*. – 2020. – Vol. 32. – P. 354–357. – DOI: 10.1016/j.matpr.2020.01.605.
8. 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.
9. 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)-01.
10. Performance analysis of conventional and high-feed turning tools in machining the thermally affected zone after plasma arc cutting of low carbon manganese-alloyed steel / M.B. Barcelos, D.T. de Almeida, F. Tuset, C.J. Scheuer // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2024. – Vol. 115. – P. 18–39. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2024.01.08.
11. 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 (3). – P. 303–308. – DOI: 10.1016/j.jestech.2014.07.004.
12. Gariboldi E., Previtali B. High tolerance plasma arc cutting of commercially pure titanium // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2005. – Vol. 160. – P. 77–89. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.04.366.
13. Structural features and morphology of surface layers of AA2024 and AA5056 aluminum alloys during plasma cutting / A.V. Grinenko, E.O. Knyazhev, A.V. Chumaevskii, A.V. Nikolaeva, A.O. Panfilov, A.M. Cheremnov, L.L. Zhukov, A.V. Gusarova, P.S. Sokolov, D.A. Gurianov, V.E. Rubtsov, E.A. Kolubaev // *Russian Physics Journal*. – 2023. – Vol. 66. – P. 925–933. – DOI: 10.1007/s11182-023-03025-9.
14. 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.
15. Закономерности износа плазмотронов при плазменной резке толстолистового проката на токе обратной полярности / Е.А. Сидоров, А.В. Гриненко, А.В. Чумаевский, А.О. Панфилов, Е.О. Княжев, А.В. Николаева, А.М. Черемнов, В.Е. Рубцов, В.Р. Утяганова, К.С. Осипович, Е.А. Колубаев // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2024. – Т. 26, № 3. – С. 149–162. – DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.3-149-162.
16. Structure formation in surface layers of aluminum and titanium alloys during plasma cutting / A.V. Chumaevskii, A.V. Nikolaeva, A.V. Grinenko, A.O. Panfilov, E.O. Knyazhev, A.M. Cheremnov, V.R. Utyaganova, V.A. Beloborodov, P.S. Sokolov,



D.A. Gurianov, E.A. Kolubaev // Physical Mesomechanics. – 2023. – Vol. 26. – P. 711–721. – DOI: 10.1134/S1029959923060103.

17. *Boulos M.I., Fauchais P., Pfender E.* Plasma torches for cutting, welding and PTA coating // Handbook of Thermal Plasmas. – Cham: Springer, 2023. – DOI: 10.1007/978-3-319-12183-3_47-2.

18. Influence of reverse-polarity plasma cutting parameters on structure and surface roughness of aluminum alloys / A. Grinenko, A. Chumaevsky, E.O. Knjazhev, D.A. Gurianov, E.A. Sidorov, E.A. Kolubaev // Russian Physics Journal. – 2024. – Vol. 67 (9). – P. 1287–1293. – DOI: 10.1007/s11182-024-03246-6.

19. Влияние высокоэнергетического воздействия при плазменной резке на структуру и свойства поверхностных слоёв алюминиевых и титановых сплавов / 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.В. Гриненко, Е.А. Колубаев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 4. –

C. 216–231. – DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.4-216-231.

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. *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.

22. *Kudrna L., Fries J., Merta M.* Influences on plasma cutting quality on CNC machine // Multidisciplinary Aspects of Production Engineering. – 2019. – Vol. 2 (1). – P. 108–117. – DOI: 10.2478/mape-2019-0011.

23. An experimental analysis of cutting quality in plasma arc machining / M. Gostimirović, D. Rodić, M. Sekulić, A. Aleksic // Advanced Technologies & Materials. – 2020. – Vol. 45 (1). – P. 1–8. – DOI: 10.24867/ATM-2020-1-001.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2024 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



Geometry distortion, edge oxidation, structural changes and cut surface morphology of 100mm thick sheet product made of aluminum, copper and titanium alloys during reverse polarity plasma cutting

Artem Grinenko^{1, a}, Andrey Chumaevsky^{2, b, *}, Evgeny Sidorov^{2, c}, Veronika Utyaganova^{2, d},
Alihan Amirov^{2, e}, Evgeniy Kolubaev^{2, f}

¹ ITS-Siberia LLC, Krasnoyarsk, 16a Severnoe shosse, 660118, Russian Federation

² Institute of Strength Physics and Materials Sciences SB RAS, 2/4, pr. Akademicheskii, Tomsk, 634055, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0009-0002-9511-1303>, giga2011@yandex.ru; ^b <https://orcid.org/0000-0002-1983-4385>, tch7av@gmail.com;

^c <https://orcid.org/0009-0009-2665-7514>, eas@ispms.ru; ^d <https://orcid.org/0000-0002-2303-8015>, veronika_ru@ispms.ru;

^e <https://orcid.org/0000-0002-5143-8235>, amir@ispms.tsc.ru; ^f <https://orcid.org/0000-0001-7288-3656>, eak@ispms.tsc.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 17 September 2024

Revised: 01 October 2024

Accepted: 10 October 2024

Available online: 15 December 2024

Keywords:

Plasma cutting

Macrostructure

Heat-affected zone

Metal melting

Cutting parameters

Reverse polarity current

Thick sheet metal

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 was partially conducted at core facility “Structure, mechanical and physical properties of materials” and center “Nanotech” ISPMS RAS.

ABSTRACT

The introduction describes the feasibility of using reverse polarity plasma cutting to produce large-sized non-ferrous metal blanks up to 100 mm thick. Data on the use of plasma cutting with direct and reverse polarity currents for thick sheet metal and the main technological problems associated with its implementation are presented. **The purpose of the work** is to study the organization of the structure and properties of the near-surface zone, changes in the chemical and phase composition when cutting aluminum, copper and titanium alloys. The research methods are optical and scanning electron microscopy, microhardness measurement, X-ray diffraction and energy-dispersive analysis. Plasma cutting was carried out using air as a plasma-forming and shielding gas, simultaneously with water injection into the discharge chamber and the formation of a “water fog” around the plasma column. **Results and discussion.** It is shown that both the arc stability and the shape of the plasma column are of great importance in reverse polarity plasma cutting of rolled sheets. The distortion of the cutting geometry during normal operation is greatest in the central part, and with insufficient heat input it shifts to the lower part and increases significantly. The operation of the plasma torch in air does not lead to significant changes in the composition of the cutting surface of aluminum and copper alloys. A decrease in the magnesium content near the edge is typical for the aluminum alloy in the surface layers. Cutting of the titanium alloy is accompanied by intense oxidation of the surface, especially in areas of difficult metal displacement from the cutting cavity. The formation of titanium oxides, mainly rutile Ti_2O_3 , sharply increases the microhardness values in the surface layers, which negatively affects the machinability of the cutting edge and requires shot blasting to remove the oxide layer. **The conclusion** describes the main patterns of implementing reverse polarity plasma cutting of sheet metal from aluminum, copper and titanium alloys with a thickness of 100 mm.

For citation: Grinenko A.V., Chumaevsky A.V., Sidorov E.A., Utyaganova V.R., Amirov A.I., Kolubaev E.A. Geometry distortion, edge oxidation, structural changes and cut surface morphology of 100mm thick sheet product made of aluminum, copper and titanium alloys during reverse polarity plasma cutting. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2024, vol. 26, no. 4, pp. 41–56. DOI:10.17212/1994-6309-2024-26.4-41-56. (In Russian).

* Corresponding author

Chumaevsky Andrey V., D.Sc. (Engineering), Leading researcher,
Institute of Strength Physics and Materials Sciences SB RAS,
2/4, pr. Akademicheskii,
634055, Tomsk, Russian Federation
Tel.: +7 (382) 228-68-63, e-mail: tch7av@ispms.ru

References

1. Levichev N., Tomás García A., Dewil R., Duflou J.R. A virtual sensing approach for quality and productivity optimization in laser flame cutting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, vol. 121, pp. 6799–6810. DOI: 10.1007/s00170-022-09750-8.
2. Barsukov G.V., Selemenov M.F., Zhuravleva T.A., Kravchenko I.N., Selemenova E.M., Barmina O.V. Influence of the parameters of chemical thermal treatment of copper slag particles on the quality of hydroabrasive cutting. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2023, vol. 52, pp. 679–686. DOI: 10.1134/S1052618823070075.
3. Barsukov G., Zhuravleva T., Kozhus O. Quality of hydroabrasive waterjet cutting machinability. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 206, pp. 1034–1038. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.590.
4. Wei J., He W., Lin C., Zhang J., Chen J., Xiao J., Xu J. Optimizing process parameters of in-situ laser assisted cutting of glass-ceramic by applying hybrid machine learning models. *Advanced Engineering Informatics*, 2024, vol. 62, p. 102590. DOI: 10.1016/j.aei.2024.102590.
5. Shulyat'ev V.B., Gulov M.A., Karpov E.V., Malikov A.G., Boiko K.R. Laser cutting of aluminum alloys using pulsed radiation from a CO₂ laser under conditions of an optical discharge in an argon jet. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, 2023, vol. 50, pp. S1075–S1078. DOI: 10.3103/S1068335623220116.
6. He G.-J., Gu L., Zhu Y.-M., Chen J.-P., Zhao W.-S., Rajurkar K.P. Electrical arc contour cutting based on a compound arc breaking mechanism. *Advances in Manufacturing*, 2022, vol. 10 (4), pp. 583–595. DOI: 10.1007/s40436-022-00406-0.
7. Sharma D.N., Kumar J.R. Optimization of dross formation rate in plasma arc cutting process by response surface method. *Materials Today: Proceedings*, 2020, vol. 32, pp. 354–357. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.01.605.
8. 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.
9. 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)-01.
10. Barcelos M.B., Almeida D.T. de, Tusset F., Scheuer C.J. Performance analysis of conventional and high-feed turning tools in machining the thermally affected zone after plasma arc cutting of low carbon manganese-alloyed steel. *Journal of Manufacturing Processes*, 2024, vol. 115, pp. 18–39. DOI: 10.1016/j.jmapro.2024.01.08.
11. 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 (3), pp. 303–308. DOI: 10.1016/j.jestech.2014.07.004.
12. Gariboldi E., Previtali B. High tolerance plasma arc cutting of commercially pure titanium. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, vol. 160, pp. 77–89. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.04.366.
13. Grinenko A.V., Knyazhev E.O., Chumaevskii A.V., Nikolaeva A.V., Panfilov A.O., Cheremnov A.M., Zhukov L.L., Gusarova A.V., Sokolov P.S., Gurianov D.A., Rubtsov V.E., Kolubaev E.A. Structural features and morphology of surface layers of AA2024 and AA5056 aluminum alloys during plasma cutting. *Russian Physics Journal*, 2023, vol. 66, pp. 925–933. DOI: 10.1007/s11182-023-03025-9.
14. 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 (tekhnologiya, 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.
15. Sidorov E.A., Grinenko A.V., Chumaevsky A.V., Panfilov A.O., Knyazhev E.O., Nikolaeva A.V., Cheremnov A.M., Rubtsov V.E., Utyaganova V.R., Osipovich K.S., Kolubaev E.A. Patterns of reverse-polarity plasma torches wear during cutting of thick rolled sheets. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2024, vol. 26, no. 3, pp. 149–162. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.3-149-162.
16. Chumaevskii A.V., Nikolaeva A.V., Grinenko A.V., Panfilov A.O., Knyazhev E.O., Cheremnov A.M., Utyaganova V.R., Beloborodov V.A., Sokolov P.S., Gurianov D.A., Kolubaev E.A. Structure formation in surface layers of aluminum and titanium alloys during plasma cutting. *Physical Mesomechanics*, 2023, vol. 26, pp. 711–721. DOI: 10.1134/S1029959923060103.
17. Boulos M.I., Fauchais P., Pfender E. Plasma torches for cutting, welding and PTA coating. *Handbook of thermal plasmas*. Cham, Springer, 2023. DOI: 10.1007/978-3-319-12183-3_47-2.
18. Grinenko A.V., Chumaevskii A.V., Knjazhev E.O., Gurianov D.A., Sidorov E.A., Kolubaev E.A. Influence of reverse-polarity plasma cutting parameters on structure and surface roughness of aluminum alloys. *Russian Physics Journal*, 2024, vol. 67 (9), pp. 1287–1293. DOI: 10.1007/s11182-024-03246-6.

19. Rubtsov V.E., Panfilov A.O., Knyazhev E.O., Nikolaeva A.V., Cheremnov A.M., Gusarova A.V., Beloborodov V.A., Chumaevskii A.V., Grinenko A.V., Kolubaev E.A. Influence of high-energy impact during plasma cutting on structure and properties of surface layers of aluminum and titanium alloys. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2023, vol. 25, no. 4, pp. 216–231. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.4-216-231.

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. 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.

22. Kudrna L., Fries J., Merta M. Influences on plasma cutting quality on CNC machine. *Multidisciplinary Aspects of Production Engineering*, 2019, vol. 2 (1), pp. 108–117. DOI: 10.2478/mape-2019-0011.

23. Gostimirović M., Rodić D., Sekulić M., Aleksic A. An experimental analysis of cutting quality in plasma arc machining. *Advanced Technologies & Materials*, 2020, vol. 45 (1), pp. 1–8. DOI: 10.24867/ATM-2020-1-001.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2024 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>).