

НГТУ



НЭТИ

Обработка металлов

(технология • оборудование • инструменты)

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

Закономерности износа плазмотронов при плазменной резке толстолистового проката на токе обратной полярности

Евгений Сидоров ^{1, a, *}, Артем Гриненко ^{2, b}, Андрей Чумаевский ^{1, c}, Александр Панфилов ^{1, d},
Евгений Княжев ^{1, e}, Александра Николаева ^{1, f}, Андрей Черемнов ^{1, g}, Валерий Рубцов ^{1, h},
Вероника Утяганова ^{1, i}, Ксения Осипович ^{1, j}, Евгений Колубаев ^{1, k}

¹ Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Академический проспект, 2/4, Томск, 634055, Россия² ООО «ИТС-Сибирь», Красноярск, Северное шоссе, 16а, 660118, Россия

^a  <https://orcid.org/0009-0009-2665-7514>,  eas@ispms.ru; ^b  <https://orcid.org/0009-0002-9511-1303>,  giga2011@yandex.ru;
^c  <https://orcid.org/0000-0002-1983-4385>,  tch7av@gmail.com; ^d  <https://orcid.org/0000-0001-8648-0743>,  alexpl@ispms.ru;
^e  <https://orcid.org/0000-0002-1984-9720>,  clothoid@ispms.tsc.ru; ^f  <https://orcid.org/0000-0001-8708-8540>,  nikolaeva@ispms.tsc.ru;
^g  <https://orcid.org/0000-0003-2225-8232>,  amc@ispms.tsc.ru; ^h  <https://orcid.org/0000-0003-0348-1869>,  rvy@ispms.tsc.ru;
ⁱ  <https://orcid.org/0000-0002-2303-8015>,  veronika_ru@ispms.ru; ^j  <https://orcid.org/0000-0001-9534-775X>,  osipovich_k@ispms.ru;
^k  <https://orcid.org/0000-0001-7288-3656>,  eak@ispms.tsc.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.791.14

История статьи:

Поступила: 16 июня 2024

Рецензирование: 22 июня 2024

Принята к печати: 04 июля 2024

Доступно онлайн: 15 сентября 2024

Ключевые слова:

Плазменная резка
Макроструктура
Износ
Сопло
Электрод
Зона термического влияния
Плавление металла
Параметры резки

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 описаны особенности процесса плазменной резки различных металлов и сплавов с использованием плазмотронов с обратной полярностью и особенности резки толстолистового проката. **Цель работы:** исследование процесса износа плазмотронов, работающих на токе обратной полярности, при резке толстолистового проката алюминиевых и титановых сплавов. **Методами исследования** являются оптическая и растровая электронная микроскопия, съемка процесса резки и визуальный осмотр элементов плазмотрона после получения образцов. **Результаты и обсуждение.** В разделе показан внешний вид основных рабочих элементов плазмотрона после резки на различных режимах, приводивших как к стабильному и постепенному изнашиванию, так и к катастрофическому выходу плазмотрона из строя. Представлены результаты структурных исследований основных характерных зон сопел и электродов после резки. Проведенные исследования позволили установить основные причины выхода из строя рабочих элементов плазмотронов, работающих на токе обратной полярности. К причинам катастрофического выхода из строя плазмотронов относятся несоблюдение величины зазора между соплом и электродом и оплавление канала подачи газа в разрядную камеру. Износ сопел и электродов в стабильном режиме может быть интенсифицирован при нештатной работе пусковой дуги, наличии неточностей изготовления и превышении давления газа. **В заключении** сформулированы основные выводы по результатам проведенных исследований. Описан процесс износа электродов, сопел и корпусных элементов плазмотронов в процессе работы при высоких значениях мощности электрической дуги.

Для цитирования: 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.

*Адрес для переписки

Сидоров Евгений Алексеевич, аспирант, инженер
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
Академический проспект, 2/4,
634055, г. Томск, Россия
Тел.: 8 (382) 228–68–63, e-mail: eas@ispms.ru

Введение

Плазменная резка различных металлов и сплавов обладает рядом преимуществ для промышленного применения, связанных с высокой производительностью, качеством реза и возможностью резки толстолистого проката [1–3]. Методом плазменной резки эффективно получают заготовки из сталей [4], а также алюминиевых [5], медных [6] и титановых [7] сплавов. При резке возможно как формирование четкого реза под углом 90° к поверхности листа, так и формирование необходимой разделки кромок под дальнейшую сварку конструкций [8]. В основном для плазменной резки применяется оборудование, работающее на токе прямой полярности [9, 10] и имеющее ограничения по резке толстолистого проката.

Технология плазменной резки на токе обратной полярности позволяет повысить производительность процесса [11–14], особенно при производстве крупногабаритных заготовок. На сегодняшний день в литературных источниках присутствует достаточно небольшое количество данных по резке листового проката цветных металлов и сплавов толщиной порядка 30...100 мм [15–18]. При этом плазменная резка толстолистого проката обладает рядом сложностей, связанных с высокими значениями тока плазмообразующей дуги и интенсивным её воздействием на рабочие элементы плазматрона. Помимо исследований, направленных на установление влияния параметров процесса резки на качество поверхности и структурно-фазовые изменения при воздействии плазменной струи на материал [12, 16], необходимо проведение работ в области изменения состояния плазматрона при резке. Особенно это актуально с точки зрения экономической эффективности плазменной резки на токе обратной полярности, так как для неё характерна меньшая степень изнашивания элементов плазматронов при эксплуатации [11].

Плазменная резка на токе обратной полярности, несмотря на длительное время работы, является перспективным методом для получения заготовок из толстолистого проката в промышленности. Плазменная резка на токе обратной полярности наиболее актуальна применительно к заготовкам толстолистого проката. Это обусловлено меньшими значениями тока

при одинаковой толщине разрезаемых плит в сравнении с резкой на токе прямой полярности. Применяемые для резки на токе обратной полярности системы с полым анодом позволяют получить меньшую плотность тока на его поверхности в сравнении с термохимическими катодами при резке на токе прямой полярности, что также способствует повышению ресурса плазматронов. По этим причинам плазменная резка на токе обратной полярности для толстолистого проката является более актуальной как с точки зрения экономичности процесса, так и из соображений надежности и долговечности оборудования. В этом направлении сейчас требуется развитие современных конструкторских решений и разработка оборудования для плазменной резки отечественного производства, обладающего рядом преимуществ в сравнении с имеющимися аналогами. В настоящее время в рамках совместного проекта ИФПМ СО РАН и ООО «ИТС-Сибирь» ведется разработка современного оборудования для плазменной резки толстолистого проката цветных металлов и сплавов больших толщин на токе обратной полярности.

Целью работы является выявление основных закономерностей процесса выхода из строя рабочих элементов плазматронов разрабатываемой конструкции в зависимости от различных факторов в процессе резки.

Методика исследований

Экспериментальные исследования выполнялись на производственном участке в ООО «ИТС-Сибирь» и на экспериментальном оборудовании в ИФПМ СО РАН. Резку осуществляли на плазматроне с обратной полярностью, разрабатываемом в процессе проведения совместного научно-технического проекта. Схема работы плазматрона и реализации процесса плазменной резки приведена на рис. 1, а. Резка пластин 1 выполнялась плазменной струей 2, формируемой в среде защитного и плазмообразующего газа 3 за счет горения пусковой дуги 4 на старте процесса и рабочей дуги 5 непосредственно при резке. Подача защитного и плазмообразующего газа 6 в зону резки производится при фиксированном давлении от компрессора. Сопло 7 фиксируется гайкой 8 и служит для формирования плотной струи газа и плазмы 9, формирующей-

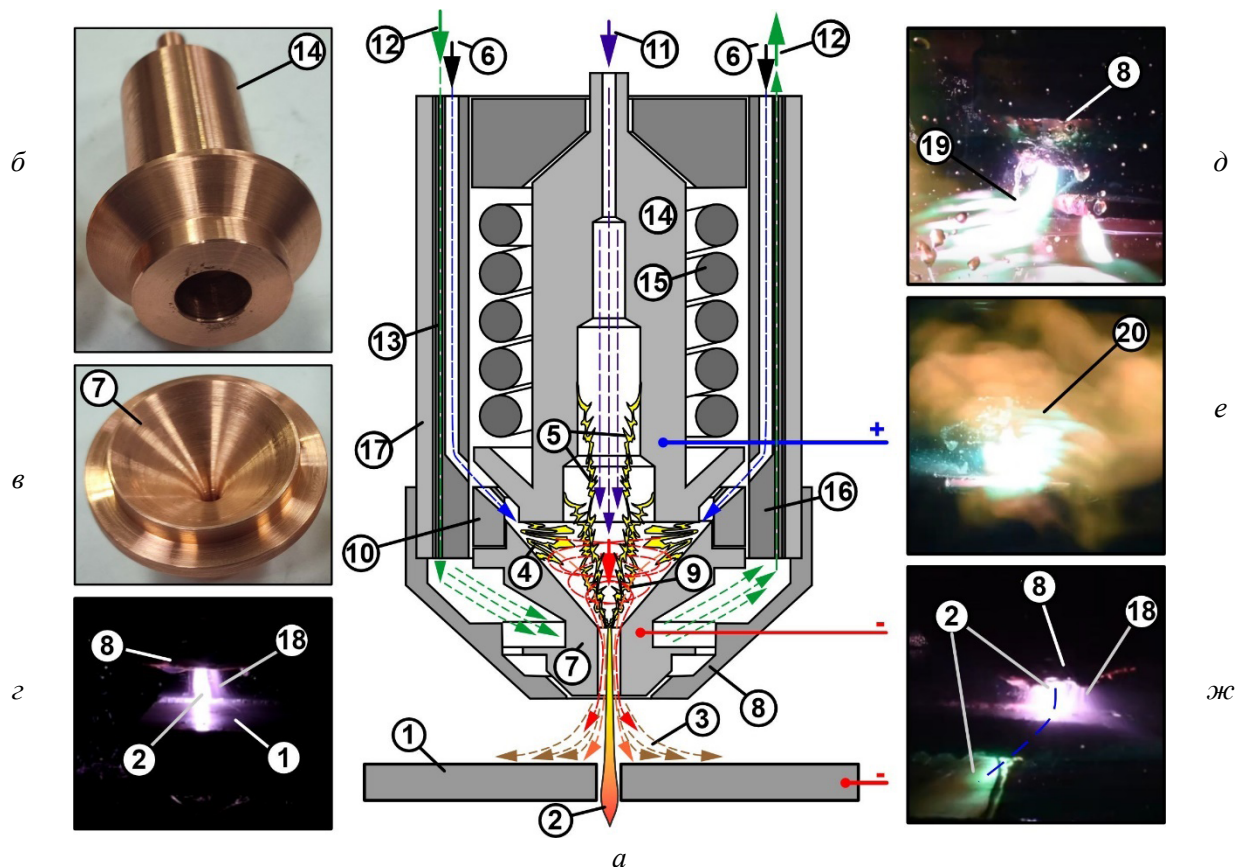


Рис. 1. Схема работы плазматрона на токе обратной полярности (а), внешний вид рабочего электрода (б) и сопла (в), процесса резки в нормальных условиях (з), старта процесса резки (д), процесса внешнего горения дуги (е) и резки с избыточной скоростью (жс):

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; 19 – горение дуги в момент запуска; 20 – внешнее горение дуги

Fig. 1. The operational scheme of the reverse-polarity plasma torch (a), the appearance of the working electrode (b) and nozzle (v), the cutting process under normal conditions (z), the start of the cutting process (d), the process of external arc burning (e) and cutting with excess speed (жс):

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 – swirl ring; 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 fluoroplastic; 17 – outer steel casing; 18 – “water mist”; 19 – arc burning at the moment of starting; 20 – external arc burning

ся за счет завихрителя 10 и горения дуги. Дополнительно на плазматроне разрабатываемой конструкции предусмотрено введение воды 11 в зону резки через отверстие в рабочем электроде 14. Это способствует увеличению качества реза и снижению износа сопла и электрода [19, 20]. Защита от перегрева сопла и электрода производится также постоянным потоком воды 12 через каналы в корпусе 13. Подача воды в плазматроне устроена таким образом, что поток 13 сначала омывает сопло, затем электрод, после чего

проводится частично на выход из плазматрона и во внутреннюю полость сопла и далее потоком 11 – в рабочую зону. Подвод тока к электроду производится через медный соленоид 15, дополнительно формирующий магнитное поле для фокусирования потока плазмы и электрической дуги. Внутренний корпус плазматрона 16 с каналами подачи воды и воздуха, изготовлен из фторопласта, а внешний корпус 17 – из стали. Рабочий электрод 14 (рис. 1, б) и сопло 7 (рис. 1, в) изготовлены из меди марки М1.

Работа плазмотрона в стандартном режиме связана с образованием плазменной струи вокруг плазмообразующей дуги (рис. 1, з). Подача воды в зону резки приводит к образованию водяного тумана 18 (рис. 1, з). Наличие водяного тумана при резке ускоряет процесс охлаждения материала и дает возможность резки алюминиевых сплавов без защитной атмосферы в виде азота, так как окисление кромки для них является минимальным, а качество реза – достаточно высоким [19, 20].

Основные сложности при резке возникали на старте процесса, когда происходит зажигание пусковой дуги и далее формирование рабочей дуги 19 с плазменным столбом (рис. 1, д). В данном случае если процесс происходит в штатном режиме и образуется плазменный столб, то дуга закорачивается между листом и электродом, а плазменная струя отключается (рис. 1, з). При наличии проблем на старте возможна реализация эффекта внешнего горения дуги (рис. 1, е), когда зажигание рабочей дуги не поддерживает образования плазменной струи.

Резку осуществляли по режимам, характерным для плит алюминиевых и титановых сплавов толщиной 60...100 мм. Отработка и оптимизация режимов резки толстолистого проката цветных металлов производилась ранее в работах [13–16]. Ток электрической дуги составлял от 300 до 370 А, напряжение – от 300 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 газа использовался воздух. Основной целью работы являлось описание характерных картин износа сопел и электродов плазмотрона в процессе эксплуатации и выявление причин их появления.

После получения экспериментальных образцов изношенных сопел и электродов плазмотронов в различных режимах из них электроэрозионным методом (станок DK7750) производилась вырезка металлографических шлифов для структурных исследований. Структурные исследования проводились на оптическом микроскопе «Альтами MET 1С», лазерном

сканирующем микроскопе Olympus LEXT 4100 и растровом электронном микроскопе Zeiss LEO EVO 50.

Результаты и их обсуждение

Плазменная резка толстолистого проката на токах более 300 А приводит к значительным повреждениям расходных элементов (рис. 2). Наиболее существенные повреждения происходят в момент запуска процесса при работе пусковой дуги, после чего основным механизмом изнашивания сопла и электрода является эрозия при взаимодействии с газоплазменным потоком.

На начальном этапе процесса особое значение имеет точность сопряжения между соплом и электродом, зазор в котором для плазмотрона данной конструкции должен быть примерно 1,0–1,5 мм. При низкой величине зазора повышается риск длительного двойного дугообразования на этапе работы или замыкания к разрядной камере при включении, что может привести к катастрофическому выходу из строя рабочих элементов (рис. 2, в, з).

Одной из причин выхода из строя плазмотронов может являться оплавление отверстий в завихрителе, приводящее к резкому повышению температуры в полости между электродом и соплом за счет отсутствия отвода тепла потоком газа (рис. 2, д, е). В результате резко оплавляется металл сопла и электрода и перекрывается отверстие в сопле.

Процесс постепенного изнашивания материала сопла и электрода в основном связан с высокотемпературной эрозией при взаимодействии меди с потоком плазмы и газа (рис. 2, ж–м). Этот процесс может дополнительно осложняться работой пусковой дуги при резке (рис. 2, ж, з) или неточностью изготовления элементов плазмотрона (рис. 2, и, к).

При средней наработке на отказ более 250–300 пусков расходных элементов (сопло и электрод) в процессе резки толстолистого (до 100 мм) проката несвоевременное выключение пусковой дуги или неточности изготовления могут снизить указанный параметр до 100–150 пусков. Процессы катастрофического выхода из строя плазмотронов приводят к резкому выходу устройства из строя даже при одном включении, их причиной является в основном недостаточный зазор между соплом и электродом.



Рис. 2. Внешний вид сопел (а, в, д, ж, и, л) и электродов (б, г, е, з, к, м) до испытаний (а, б), при испытании в условии несоблюдения зазора между соплом и электродом (в, г), при испытании с оплавлением отверстий подачи газа в завихрителе (д, е), при испытании без отключения пусковой дуги (ж, з) и с недостаточно точным изготовлением сопла (и, к) в условиях низкого давления газа, при испытаниях в оптимальных режимах резки без дефектов (л, м)

Fig. 2. The appearance of nozzles (а, в, д, ж, и, л) and electrodes (б, г, е, з, к, м) before testing (а, б), when tested in the condition of non-observance of the gap between the nozzle and electrode (в, г), when testing with melting of the gas supply holes in the swirl ring (д, е), when testing without turning off the starting arc (ж, з) and with insufficiently precise manufacturing of the nozzle (и, к) under conditions of low gas pressure, and when tested in optimal cutting conditions without defects (л, м)

Замыкание (через материал частично оплавленного сопла или электрода) или длительное двойное дугообразование в разрядной камере

при включении или работе приводит к резкому оплавлению материала сопла и электрода в камере. Из-за оплавления материала сопла возмож-

на закупорка отверстия расплавленным металлом (рис. 3). Указанные причины могут привести к близкой картине выхода из строя плазматрона, они обусловлены недостатком зазора между элементами или недостаточным давлением газа при резке. Явление двойного дугообразования достаточно хорошо известно, особенно при резке на прямой полярности [8]. Температура в зоне разрядной камеры за короткое время поднимается настолько, что металл начинает плавиться и кипеть, оставляя характерную структуру на поверхности в виде зоны плавления с большим ко-

личеством пор (2 на рис. 3). Причем на поверхности электрода практически не присутствуют следы окислов или продуктов эрозии, а тонкая зона плавления 2 переходит в основной металл 1 (рис. 3, а, в–д). Внутренняя поверхность сопла при этом имеет следы окисления, кипения металла и эрозии (рис. 3, б, е–з). Металл, поступивший в канал сопла, быстро кристаллизуется и закупоривает его. Поры в оплавленном материале в основном сферические 3 или неправильной формы 4 (рис. 3). На плазматроне разрабатываемой конструкции давление газа менее 2 бар по-

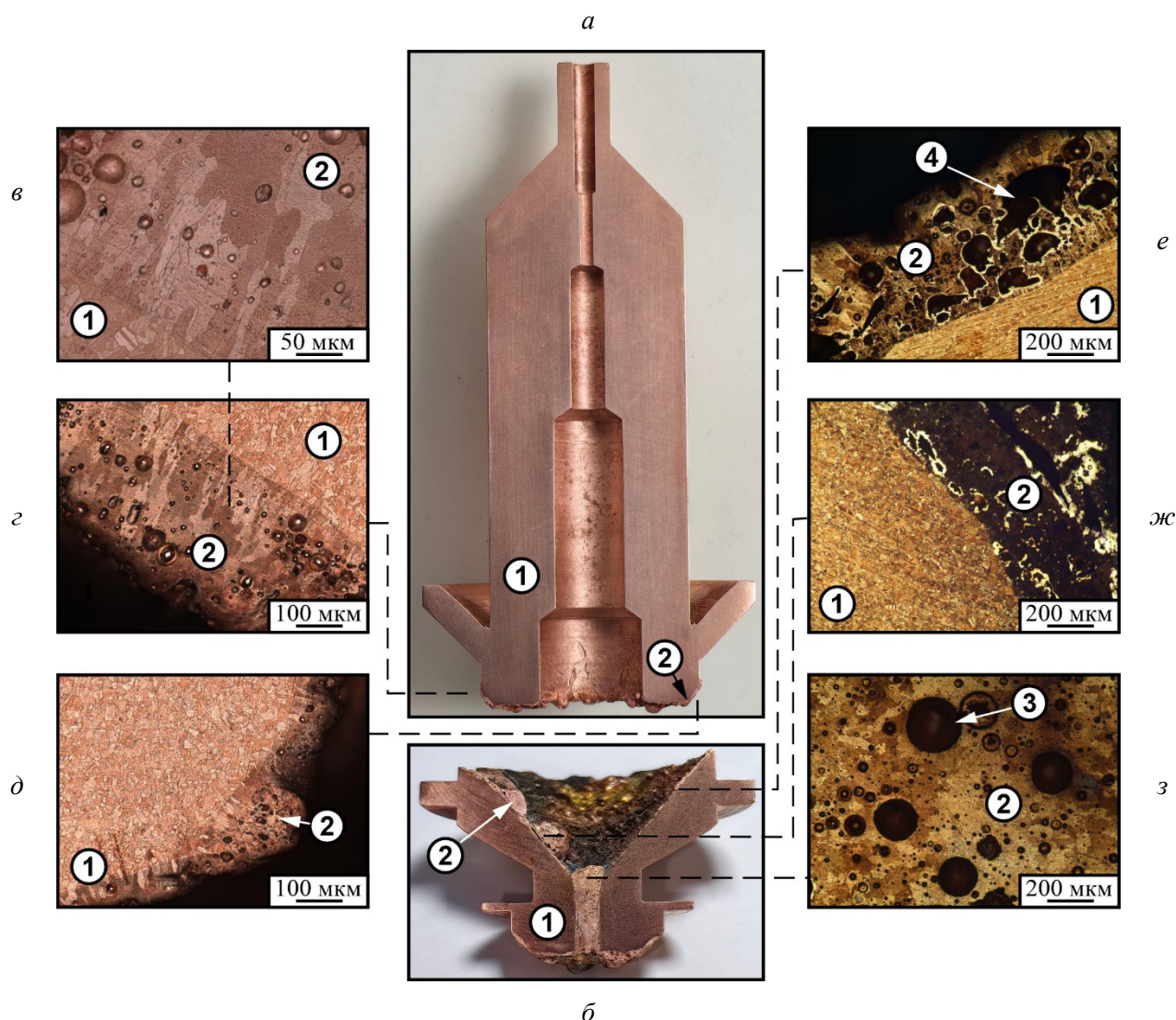


Рис. 3. Структура элементов плазматрона после катастрофического выхода из строя сопла и электрода при недостаточном зазоре между ними:

а, б – макроструктура электрода и сопла; в–д – микроструктура отдельных участков электрода; е–з – микроструктура участков сопла

Fig. 3. The structure of plasma torch elements after a catastrophic failure of the nozzle and electrode with insufficient clearance between it:

а, б – macrostructure of the electrode and nozzle; в–д – microstructure of individual sections of the electrode; е–з – microstructure of nozzle sections

вышло риск образования описанного явления. Повышение давления выше 2,5...3,0 бар и установление зазора между соплом и электродом не менее 1,0...1,5 мм практически нивелировало риск выхода из строя плазмотрона в результате двойного дугообразования или замыкания в разрядной камере.

Второй причиной катастрофического выхода из строя плазмотронов данной конструкции является оплавление каналов в завихрителе (рис. 4). В таком случае в процессе эксплуатации из-за достаточно близкого расположения к раз-

рядной зоне стыка завихрителя и сопла (рис. 4, б) может происходить их частичное сплавление. При эксплуатации под действием пусковой дуги искажение элементов в этой области постепенно накапливается настолько, что отверстия подачи газа частично перекрываются, из-за чего резко повышается температура сопла и электрода. Далее так же, как и в предыдущем случае, металл резко плавится, кипит и закупоривает отверстие сопла. При этом на поверхности и электрода, и сопла присутствуют следы эрозии и окисления при работе.

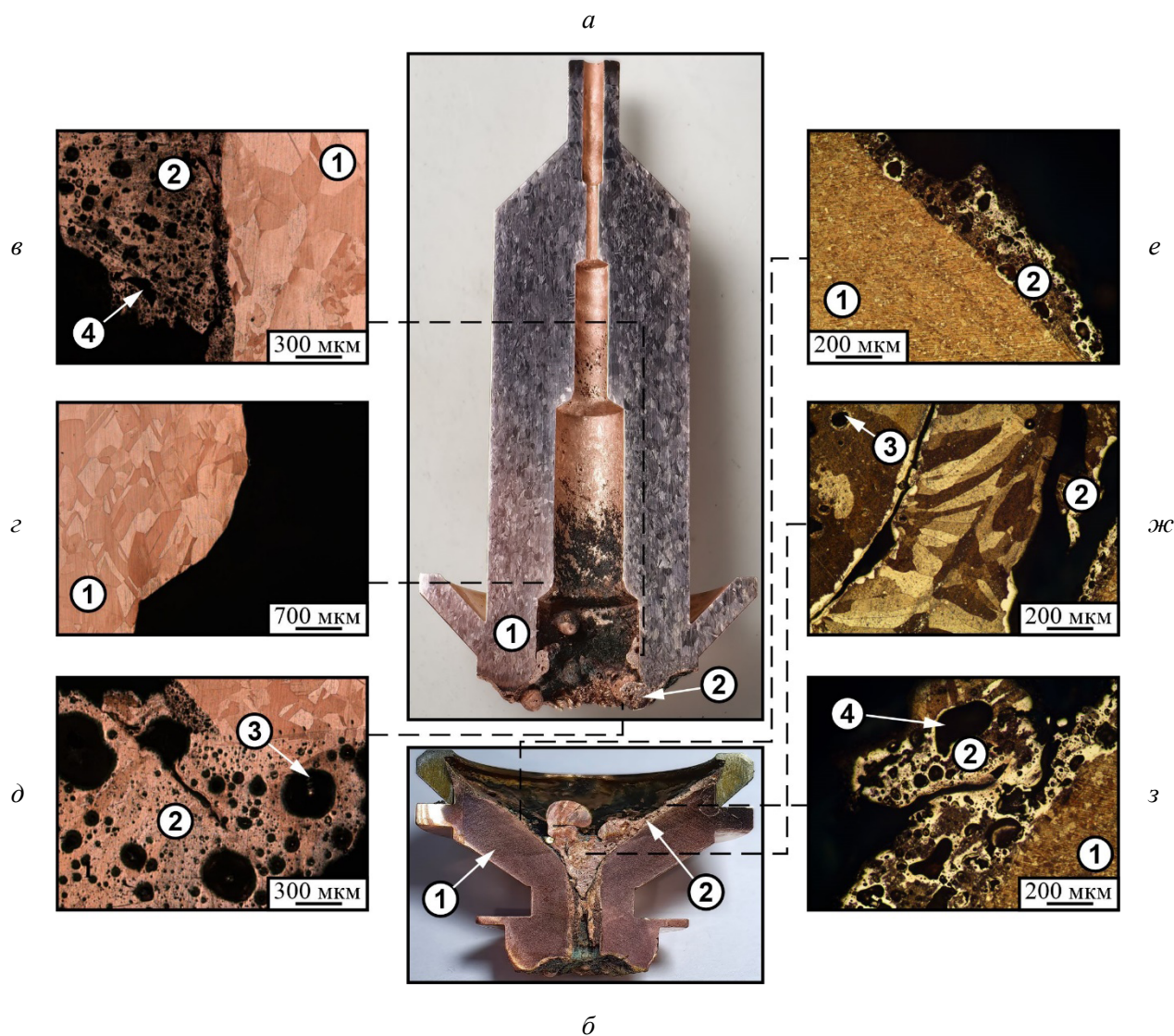


Рис. 4. Структура элементов плазмотрона после катастрофического выхода из строя сопла и электрода при закупоривании каналов подачи газа в завихрителе:

а, б – макроструктура электрода и сопла; в–д – микроструктура отдельных участков электрода; е–з – микроструктура участков сопла

Fig. 4. The structure of plasma torch elements after a catastrophic failure of the nozzle and electrode due to clogging of the gas supply channels in the swirl ring:

а, б – macrostructure of the electrode and nozzle; в–д – microstructure of individual sections of the electrode; е–з – microstructure of nozzle sections

Такое явление происходит частично из-за конструктивных причин, а частично из-за недостаточного зазора между электродом и соплом при сборке. Регулируя этот зазор на уровне 1,0...1,5 мм, можно снизить риск образования описанного процесса.

При плазменной резке зажигание пусковой дуги между электродом и соплом формирует изначальный поток плазмы в зону резки, после чего происходит переключение на рабочую дугу и резка осуществляется в штатном режиме. При несвоевременном выключении пусковой дуги

в процессе работы возможно увеличение интенсивности износа рабочих элементов плазматрона и формирования отложений на поверхности электрода (рис. 5). По данным растровой электронной микроскопии, в состав отложений (5, 6 на рис. 5) входят примеси, находившиеся в воде, медь и кислород. На поверхности сопла также присутствует достаточно значимое количество кислорода. Износ сопла и электрода ускоряется в сравнении с износом в штатном режиме, но в данном случае расходные элементы выдержали до 150 пусков при резке толстолистного проката.

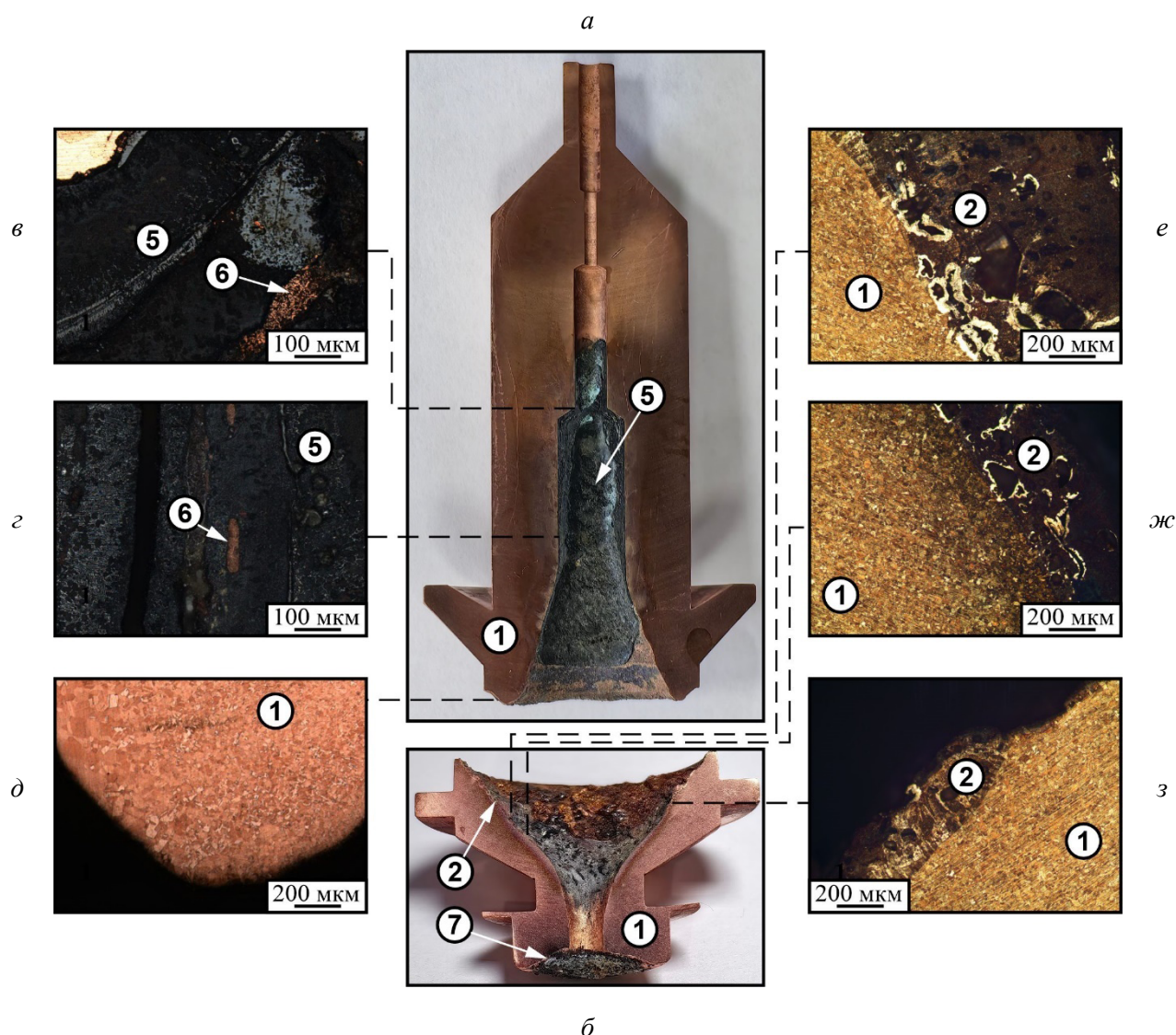


Рис. 5. Структура элементов плазматрона после постепенного выхода из строя сопла и электрода при постоянной работе пусковой дуги:

а, б – макроструктура электрода и сопла; в–д – микроструктура отдельных участков электрода; е–з – микроструктура участков сопла

Fig. 5. The structure of the plasma torch elements after the gradual failure of the nozzle and electrode during constant operation of the starting arc:

а, б – macrostructure of the electrode and nozzle; в–д – microstructure of individual sections of the electrode; е–з – microstructure of nozzle sections

Отдельно можно выделить влияние точности изготовления сопел и электродов на износ рабочих элементов. При работе в штатном режиме без значительного превышения интенсивности изнашивания рабочих элементов плазматрона отклонение от номинального положения отверстия сопла обуславливает его неравномерный износ (рис. 6). В представленном на рис. 6 случае при изготовлении сопла была допущена несоосность выходного отверстия и конической полости сопла примерно 0,4...0,5 мм. Это обусловило изначальное отклонение дуги и плазменного столба

при резке от вертикального положения и более значительный износ под углом к вертикальной оси, который со временем эксплуатации увеличивался и приводил к ещё более значительному изменению формы сопла. Проявляется также и неравномерность износа электрода. Своевременное выключение пусковой дуги, контроль и соблюдение зазора между соплом и электродом, давления газа в системе и подачи воды приводят к небольшому риску катастрофического износа расходных элементов и формирования отложений на поверхности электрода. Однако неравно-

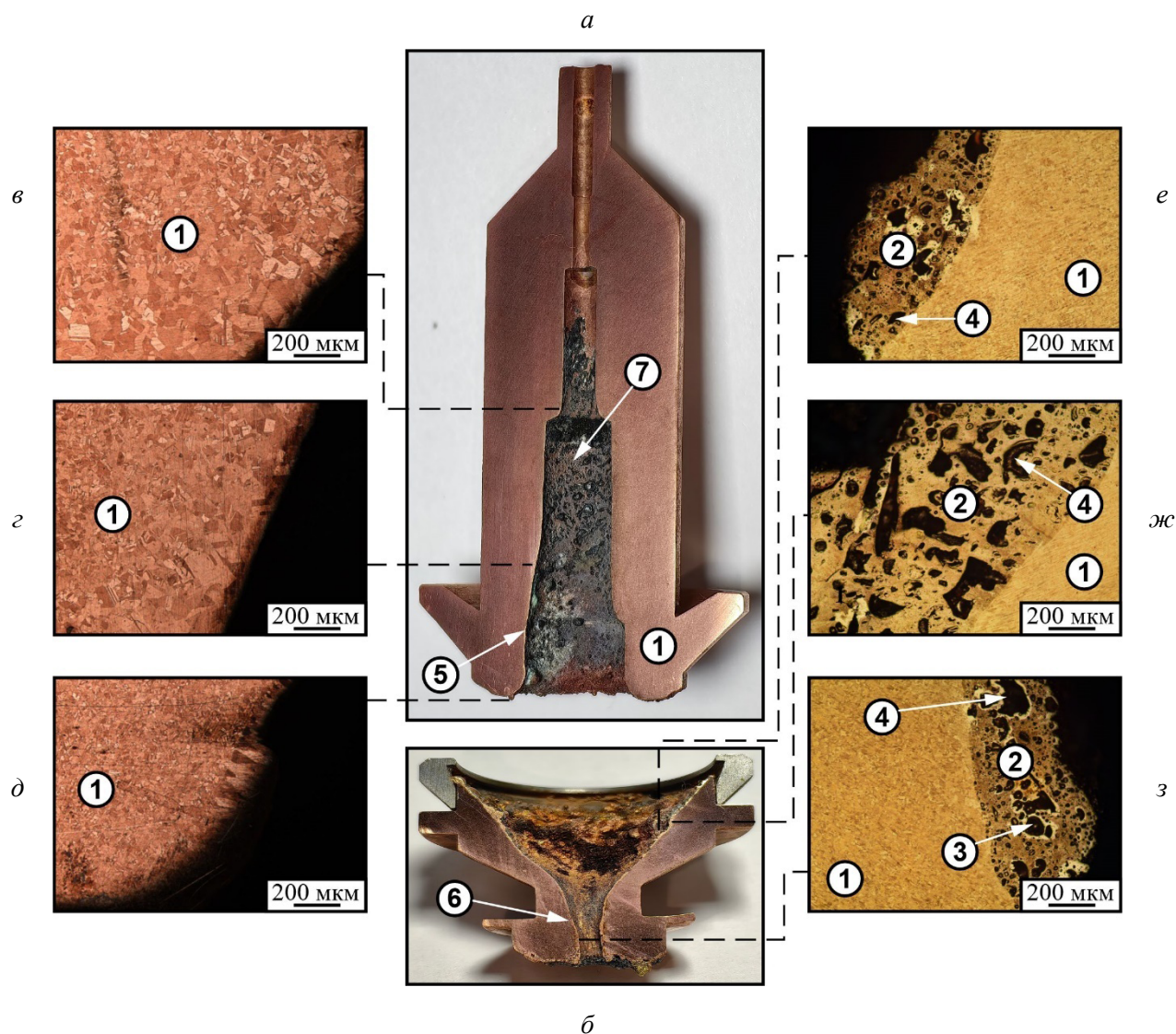


Рис. 6. Структура элементов плазматрона после постепенного неравномерного изнашивания сопла и электрода в условиях неточности изготовления расходных элементов:

a, б – макроструктура электрода и сопла; *в–д* – микроструктура отдельных участков электрода;
е–з – микроструктура участков сопла

Fig. 6. The structure of plasma torch elements after gradual uneven wear of the nozzle and electrode under conditions of inaccuracy in the manufacture of consumable elements:

a, б – macrostructure of the electrode and nozzle; *в–д* – microstructure of individual sections of the electrode;
е–з – microstructure of nozzle sections

мерный износ вызывает отклонение при работе плазменной струи от номинального положения и, как следствие, приводит к недостаточному качеству реза после 100–150 пусков. По этой причине соосность отверстий на выходе и в конической части сопла плазмотрона должна быть на достаточно высоком уровне для обеспечения точности реза при эксплуатации плазмотрона.

Резка образцов в штатном режиме характеризуется минимальной интенсивностью износа расходных элементов, что показано на рис. 2, л, м. Повышение давления газа (воздуха) в системе от 2,0...2,5 до 3,0...3,5 бар увеличивает срок службы расходных элементов плазмотрона более чем в два раза и снижает риск двойного дугообразования при работе. Повышение давления в разрядной камере приводит при несоблюдении давления воды на входе в плазмотрон к выдавливанию частично газа и плазмы в отверстие электрода и его эрозии, что можно наблюдать при визуальном осмотре (рис. 2, л, м). Увеличение сопротивления течению воды на выходе из плазмотрона также позволило нивелировать указанный дефект в работе, даже при наличии неточностей в изготовлении сопла или несвоевременного выключения пусковой дуги, что можно видеть по отсутствию повреждений в верхней части рабочих электродов на рис. 5 и 6.

Закключение

Процесс плазменной резки на токе обратной полярности является достаточно сложным, неоднородным во времени и зависящим от большого количества различных факторов. Проведенные исследования показывают, что аналогично ряду более ранних исследований на плазмотронах прямой полярности и на меньших толщинах разрезаемого листового проката [11, 16, 20 и др.] основными из наиболее опасных факторов для катастрофического выхода из строя рабочих элементов плазмотронов в условиях резки толстолистового проката титановых и алюминиевых сплавов на токе обратной полярности являются несоблюдение зазора в разрядной камере и низкое давление газа в системе. Эти факторы могут привести к двойному дугообразованию при резке и замыканию между электродом и соплом через оплавленный металл. Соблюдение минимального зазора и давление газа выше 2,5...3,0 атмосфер

позволяют значительно снизить риск катастрофического выхода из строя сопел и электродов.

Применение технологии впрыска воды в рабочую зону позволяет улучшить качество реза и продолжительность работы расходных элементов, что также описано в работах [17, 18], но может привести к некоторому увеличению износа электрода при недостаточном сопротивлении течению воды на выходе из плазмотрона. Несосность конической части сопла и отверстия на выходе из него приводит к более быстрому выходу из строя как самого сопла, так и рабочего электрода за счет неравномерного износа. Повышенный износ рабочих элементов плазмотрона также может происходить из-за несвоевременного выключения пусковой дуги при переключении в рабочий режим.

В штатном режиме работы износ рабочих элементов разрабатываемого в ходе выполнения совместного проекта «ИТС-Сибирь» и ИФПМ СО РАН плазмотрона при резке листового проката алюминиевых и титановых сплавов толщиной до 100 мм на токе обратной полярности хотя и является достаточно интенсивным в сравнении с резкой листового проката меньших толщин, но позволяет на данное время выдерживать более 250–300 пусков с различной длиной реза.

Список литературы

1. Modeling of the polycrystalline cutting of austenitic stainless steel based on dislocation density theory and study of burr formation mechanism / J. Wen, L. He, T. Zhou [et al.] // Journal of Mechanical Science and Technology. – 2023. – Vol. 37 (6). – P. 2855–2870. – DOI: 10.1007/s12206-023-0512-8.
2. 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.
3. 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.
4. 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.



5. 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.

6. 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 (suppl. 10). – P. S1075–S1078. – DOI: 10.3103/S1068335623220116.

7. Influence of the parameters of chemical thermal treatment of copper slag particles on the quality of hydroabrasive cutting / G.V. Barsukov, M.F. Selemenev, T.A. Zhuravleva, I.N. Kravchenko, E.M. Selemeneva, O.V. Barmina // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. – 2023. – Vol. 52 (7). – P. 679–686. – DOI: 10.1134/S1052618823070075.

8. 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.

9. 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.

10. 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.

11. Ilii S.M., Coteata M. Plasma arc cutting cost // *International Journal of Material Forming*. – 2009. – Vol. 2 (suppl. 1). – P. 689–692. – DOI: 10.1007/s12289-009-0588-4.

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

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. 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.

15. Оработка 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.

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

17. 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.

18. Gariboldi E., Previtali B. High tolerance plasma arc cutting of commercially pure titanium // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2005. – Vol. 160 (1). – P. 77–89. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.04.366.

19. Cinar Z., Asmael M., Zeeshan Q. Developments in plasma arc cutting (PAC) of steel alloys: a review // *Jurnal Kejuruteraan*. – 2018. – Vol. 30 (1). – P. 7–16. – DOI: 10.17576/jkukm-2018-30(1)-02.

20. 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.

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



Patterns of reverse-polarity plasma torches wear during cutting of thick rolled sheets

Evgeny Sidorov^{1, a, *}, Artem Grinenko^{2, b}, Andrey Chumaevsky^{1, c}, Alexander Panfilov^{1, d},
 Evgeny Knyazhev^{1, e}, Alexandra Nikolaeva^{1, f}, Andrey Cheremnov^{1, g}, Valery Rubtsov^{1, h},
 Veronika Utyaganova^{1, i}, Ksenia Osipovich^{1, j}, Evgeniy Kolubaev^{1, k}

¹ Institute of Strength Physics and Materials Sciences SB RAS, 2/4, pr. Akademicheskii, Tomsk, 634055, Russian Federation

² ITS-Siberia LLC, Krasnoyarsk, 16a Severnoe shosse, 660118, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0009-0009-2665-7514>, eas@ispms.ru; ^b <https://orcid.org/0009-0002-9511-1303>, giga2011@yandex.ru;
^c <https://orcid.org/0000-0002-1983-4385>, tch7av@gmail.com; ^d <https://orcid.org/0000-0001-8648-0743>, alexpl@ispms.ru;
^e <https://orcid.org/0000-0002-1984-9720>, clothoid@ispms.tsc.ru; ^f <https://orcid.org/0000-0001-8708-8540>, nikolaeva@ispms.tsc.ru;
^g <https://orcid.org/0000-0003-2225-8232>, amc@ispms.tsc.ru; ^h <https://orcid.org/0000-0003-0348-1869>, rvy@ispms.tsc.ru;
ⁱ <https://orcid.org/0000-0002-2303-8015>, veronika_ru@ispms.ru; ^j <https://orcid.org/0000-0001-9534-775X>, osipovich_k@ispms.ru;
^k <https://orcid.org/0000-0001-7288-3656>, eak@ispms.tsc.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 16 June 2024

Revised: 22 June 2024

Accepted: 04 July 2024

Available online: 15 September 2024

Keywords:

Plasma cutting
 Macrostructure
 Wear
 Nozzle
 Electrode
 Heat affected zone
 Metal melting
 Cutting parameters

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 features of the process of plasma cutting of various metals and alloys using reverse-polarity plasma torches with and the features of cutting thick sheets. **The purpose of the work** is to study the wear process of plasma torches operating on reverse polarity current when cutting thick rolled sheets of aluminum and titanium alloys. **Research methods** include optical and scanning electron microscopy, filming of the cutting process and visual inspection of plasma torch elements after receiving specimens. **Results and discussion.** The section shows the appearance of the main working elements of the plasma torch after cutting in various modes, which led to both stable and gradual wear and to catastrophic failure of the plasma torch. The results of structural studies of the main characteristic zones of nozzles and electrodes after cutting are presented. The studies carried out made it possible to establish the main reasons for the failure of the working elements reverse-polarity plasma torches. The causes of catastrophic failure of plasma torches include failure to maintain the gap between the nozzle and the electrode and melting of the channel of gas supply into the discharge chamber. The wear of nozzles and electrodes in a stable mode can be intensified due to abnormal operation of the starting arc, the presence of manufacturing inaccuracies and excess gas pressure. **In conclusion**, the main conclusions based on the results of the research are formulated. The process of wear of electrodes, nozzles and body elements of plasma torches during operation at high electric arc power values is described.

For citation: 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. (In Russian).

* Corresponding author

Sidorov Evgeny A., Ph.D., Student, Engineer
 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: eas@ispms.ru

References

1. Wen J., He L., Zhou T., Tian P., Zhou T., Feng Z. Modeling of the polycrystalline cutting of austenitic stainless steel based on dislocation density theory and study of burr formation mechanism. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2023, vol. 37 (6), pp. 2855–2870. DOI: 10.1007/s12206-023-0512-8.
2. 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.jestch.2014.07.004.
3. Levichev N., Tomás García A., Dewil R., Dufflou 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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 (suppl. 10), pp. S1075–S1078. DOI: 10.3103/S1068335623220116.
7. 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 (7), pp. 679–686. DOI: 10.1134/S1052618823070075.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. Ilii S.M., Coteata M. Plasma arc cutting cost. *International Journal of Material Forming*, 2009, vol. 2 (suppl. 1), pp. 689–692. DOI: 10.1007/s12289-009-0588-4.
12. Gostimirović M., Rodić D., Sekulić M., Aleksić 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.
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. 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.
15. 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.
16. 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. (In Russian).
17. 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.

18. Gariboldi E., Previtali B. High tolerance plasma arc cutting of commercially pure titanium. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, vol. 160 (1), pp. 77–89. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.04.366.
19. Cinar Z., Asmael M., Zeeshan Q. Developments in plasma arc cutting (PAC) of steel alloys: a review. *Jurnal Kejuruteraan*, 2018, vol. 30 (1), pp. 7–16. DOI: 10.17576/jkukm-2018-30(1)-02.
20. 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.

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>).