

Ресурсные характеристики плазмотрона переменного тока «Звезда»

В. В. Кошлаков, С. Г. Ребров, А. Н. Голиков, И. А. Федоров

Представлены результаты исследования уноса материалов (эрозии) наиболее теплонапряженных узлов трехфазного плазмотрона переменного тока «Звезда» мегаваттной мощности: электродов и конфузоров. Данные по уносу получены путем взвешивания исследуемых узлов после циклов их работы на фиксированных режимах. В качестве рабочего тела использовался воздух. Режимы работы плазмотрона варьировались в диапазонах изменения дуговой мощности 0,5–1,2 МВт, токов 160–400 А, расхода газа 70–170 г/с. При использовании различных выходных сопел давление в плазмотроне изменялось от 0,2 до 1,65 МПа. Показано влияние различных параметров режима работы на ресурс плазмотрона. С использованием полученных данных по эрозии электродов и конфузоров проведена оценка их ресурса.

Ключевые слова: плазмотрон переменного тока, трехфазный плазмотрон, электрическая дуга, ресурс, электроды, эрозия.

DOI: 10.51368/1996-0948-2021-4-32-39

Введение

Разработанные ранее для решения задач ракетно-космической отрасли плазмтроны переменного тока с уровнями мощности до нескольких мегаватт [1–5] могут быть применимы для реализации перспективных технологий в энергетике, металлургии и ряде других отраслей. Среди достаточно широкого круга возможных направлений использования плазмтронов можно выделить наиболее актуальные, в которых требуется переработка углеродсодержащих веществ: переработка бытовых и промышленных отходов, газификация углей и тяжелых нефтяных фракций, плазменный пиролиз природного газа и биомассы. Важнейшей характеристикой, определяющей эффек-

тивность использования плазмтронов, является ресурс непрерывной работы. Многолетняя практика работы с мощными плазмтронами показала, что их ресурс определяется в основном стойкостью дуговых каналов, которые состоят из электродов и конфузоров. Камера и выходное сопло плазмтрона также являются теплонапряженными элементами, но они обеспечивают ресурс работы существенно больший, чем дуговые каналы. Вопросам стойкости электродов плазмтрона посвящены многочисленные исследования как в России, так и за рубежом [6–9]. Величина эрозии электродов зависит как от параметров дугового воздействия (мощности дуги и скорости ее перемещения по поверхности), так и от параметров теплообмена в дуговом канале. Оптимизация режимов работы плазмтрона может обеспечить увеличение его ресурса, расширяя тем самым возможности его технологического использования.

Целью данной работы является исследование ресурса дуговых каналов плазмтрона переменного тока большой мощности. В ходе работы ставилась задача выявить основные факторы, определяющие ресурс, установить оптимальные параметры работы плазмтрона,

Кошлаков Владимир Владимирович, д.т.н.

Ребров Сергей Григорьевич, д.т.н.

E-mail: rebrov_sergey@mail.ru

Голиков Андрей Николаевич, д.т.н.

Федоров Иван Алексеевич, инженер.

АО ГНЦ «Центр Келдыша».

Россия, 125438, Москва, ул. Онежская, 8.

Статья поступила в редакцию 11 июня 2021 г.

© Кошлаков В. В., Ребров С. Г., Голиков А. Н., Федоров И. А., 2021

а также исследовать возможности увеличения его ресурса и надежности за счет совершенствования конструкции.

Особенности работы мощных трехфазных плазмотронов переменного тока

В настоящее время наиболее мощными и эффективными устройствами для получения газовых потоков с экстремальными параметрами по расходу, энтальпии и давлению являются трехфазные электродуговые плазмотроны с непосредственным питанием от высоковольтных промышленных электросетей [1–5], известные под типовым наименованием «Звезда» (что соответствует схеме подключения к сети электропитания).

Плазмотроны «Звезда» могут использоваться как источники высокотемпературного газа в тех случаях, когда необходимо обеспечить возможность выбора в широких пределах параметров газового потока: его расхода, температуры и давления. Такая возможность имеет место вследствие того, что дуговая мощность плазмотрона, которая определяется токами и напряжениями дуговых разрядов, также может изменяться в широком диапазоне. Дуговые токи можно изменять переключением индуктивных балластных нагрузок (реакторов), которые включаются последовательно с дуговыми разрядами. Напряжения на дуговых разрядах, которые уменьшаются при росте дуговых токов, могут быть значительно увеличены при росте расхода и давления газа в плазмотроне. Давление газа в камере плазмотрона, которое зависит от дуговой мощности, расхода газа и диаметра выходного сопла, также может выбираться в широком диапазоне, а именно, от единиц до примерно сотни атмосфер. Температура газа в камере плазмотрона может изменяться в диапазоне от 2500 до 5000 К, а при использовании на выходе плазмотрона газовых смесителей, которые используются для точной регулировки температуры, этот диапазон может быть расширен в сторону меньших температур с одновременным увеличением расхода газа (до нескольких кг/с). В качестве рабочих тел могут использоваться воздух, а также азот и ряд других газов, в том числе инертные (аргон, гелий), а также углеводородсодержащие газы, включая CO_2 и CH_4 . Ис-

пользование мощных плазмотронов требует создания определенной инфраструктуры: систем высокого давления с регулятором подачи газа, системы охлаждения с большим расходом воды, системы высоковольтного электропитания со стабилизирующими ток индуктивными реакторами. Для безопасной работы требуются также работающие в реальном времени системы диагностики и автоматического управления. Однако накопленный к настоящему времени большой опыт работы с мощными плазмотронами позволяет качественно изготавливать как сами плазмотроны, так и инфраструктуру для них.

С точки зрения электрофизики, плазмотроны являются электродуговыми нагревателями газа со стабилизированными в пространстве электрическими дугами [1]. В мощных трехфазных плазмотронах применяется комбинированная – газодинамическая и электромагнитная – стабилизация дуговых разрядов. Газодинамическая стабилизация обеспечивается за счет вихревой подачи газа в дуговые каналы. Это позволяет создавать разницу давлений и температур между пристеночными зонами и осью дугового канала. Так как напряжение пробоя газа зависит от температуры и давления, дуговой разряд удается удерживать на оси разрядного канала, а холодный вихрь газа у стенок защищает их от расплавления. Если задан расход газа через плазмотрон, то скорости газа в нем зависят также от диаметра выходного сопла – при уменьшении диаметра давление в плазмотроне будет расти, а скорости газа в нем уменьшаться. Существует минимальный диаметр сопла, при котором вихревая газодинамика в плазмотроне еще будет работать. Для электромагнитной стабилизации дуги и, главное, для быстрого перемещения по поверхности электродов контактирующих с ним участков дуги (так называемых «ножек» дуговых разрядов) на внешней поверхности электродов установлены электродные катушки, которые создают внутри электродов магнитное поле, способное вращать ножки дуговых разрядов в одном направлении с газовым вихрем. Для этого фазы переменного магнитного поля и переменного тока дуги внутри электрода должны совпадать, что достигается специальной схемой подключения электродных катушек и выбором толщины стенок электродов

(при прохождении через стенку электрода магнитное поле претерпевает фазовый сдвиг). Быстрое перемещение по поверхности электродов ножек дуговых разрядов способствует увеличению ресурса работы электродов и плазмотрона в целом [2].

Схема плазмотрона переменного тока «Звезда» и его подключения к системам подачи газа и электропитания представлена на рис. 1.

Плазмотрон состоит из трех идентичных дуговых каналов, расположенных под углом 120 градусов друг к другу, и общей смесительной камеры (1). Дуговой канал содержит затыльник (5), трубчатый медный электрод (4) и конфузор (2), назначением которого является интенсификация нагрева газа. На наружной поверхности электродов установлены магнитные катушки (3). К электродам подведены фазы питающей сети, причем они подключены через магнитные катушки соседней фазы. Чем больше дуговой ток, тем сильнее магнитное поле внутри дугового канала. Электроды отделены от конфузоров электрическими изоляторами. Эти изоляторы одновременно играют

роль завихрителей, т. е. устройств, через которые осуществляется тангенциальная подача рабочего газа. Основной расход рабочего газа $m_{\text{осн}}$ подается через завихрители, небольшая часть расхода $m_{\text{всп}}$ (10–20 %) подается со стороны затыльника. Смесительная камера 1 содержит выходное сопло, ось которого перпендикулярна плоскости рисунка. Для промышленной (10 кВ) трехфазной сети плазмотрон представляет собой активную нелинейную и равномерную по фазам нагрузку. Зажигание каждой дуги производится либо с помощью вспомогательного высоковольтного разряда, или путем пробоя промежутка электрод-конфузор рабочим напряжением при пониженном расходе газа. Чтобы обеспечить устойчивое горение каждой дуги и иметь возможность изменять величину тока дуги, в каждую фазу последовательно с дугой включена катушка индуктивности ($L1-L3$), причем с помощью переключений можно менять величину индуктивности и стабилизировать ток на разных уровнях. Контроль токов производится с помощью измерительных трансформаторов (ТА1-ТА3).

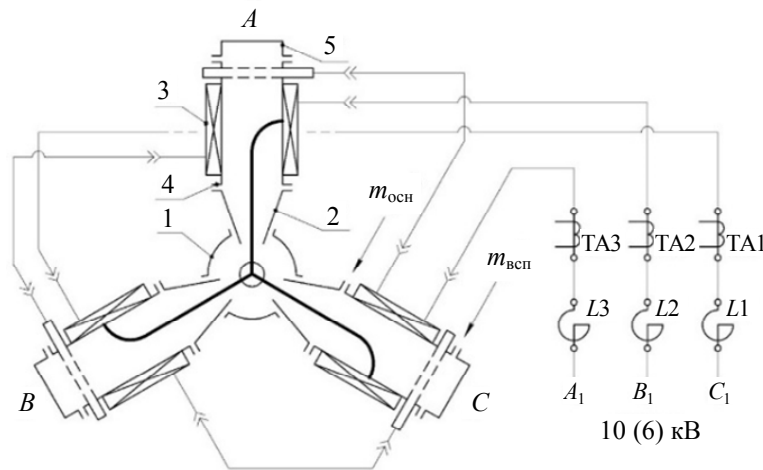


Рис. 1. Схема плазмотрона «Звезда» с системой его подключений: 1 – смесительная камера; 2 – конфузор; 3 – магнитные катушки; 4 – электрод; 5 – затыльник; А, В, С – места подключения фаз электросети.

Важным аспектом работы плазмотрона является эксплуатационный, который определяет, насколько плазмотрон удобен и надежен в эксплуатации, какой у него ресурс. Так, например, плазмотроны фирмы Westinghouse Plasma, используемые в технологиях плазменной газификации отходов, при мощности до 5 МВт имеют ресурс порядка 1000 часов непрерывной работы при использовании воздуха. В случае плазмотрона «Звезда» все узлы, кроме электродов, при правильной эксплуатации теоретически не подвержены износу. Эро-

зия электродов возникает в местах контакта дуги с материалом электрода. Кручение ножки дуги с помощью магнитного поля, создаваемого магнитной катушкой, а также иногда применяющееся непрерывное изменение (девиация) соотношения расходов газа, подаваемого через завихрители и затыльники, способствуют равномерному износу электродов. Другим проблемным участком дугового канала, который также влияет на ресурс и надежность плазмотрона, является поверхность конфузора в месте входа газа в общую камеру

плазмотрона. Этому способствует сразу несколько факторов. Во-первых, в конфузорах дуга имеет большое сопротивление за счет радиального вдува в нее холодного газа, поэтому в конфузорах осуществляется максимальное вложение электрической энергии в газ. Во-вторых, торцы конфузоров подвержены большим тепловым потокам (как лучистым, так и конвективным) со стороны высокотемпературной камеры. Перегретый участок вблизи торца конфузора может способствовать шунтированию на него дугового разряда, что резко увеличивает и без того большие тепловые потоки в стенку данного узла. Такой режим работы плазмотрона является нерасчетным, при этом в каналах охлаждения конфузора может наблюдаться кризис теплоотдачи (пленочное кипение).

Условия проведения экспериментов и их анализ

Методика исследования ресурсных характеристик плазмотрона была следующей. На выбранных режимах работы проводились включения плазмотрона длительностью от нескольких минут до 1 часа (обычно выполнялись циклы по 10 минут). Всего было выполнено 60 таких циклов. Дуговую мощность N_d варьировали в диапазоне 0,5–1,2 МВт при изменении дуговых токов I в диапазоне 160–400 А и расхода газа G_b в диапазоне 70–170 г/с. Давление в камере P_k на различных

режимах составляло от 0,2 до 1,65 МПа, а температура T_0 изменялась в диапазоне 3300–4200 К. Температура T_0 определялась с использованием расходного метода, изложенного в [1]. Перед включением измерялись геометрические размеры и масса всех электродов и конфузоров. Результатом измерений после испытаний являлось определение скорости уноса массы материала элементов дугового канала и скорости уменьшения толщин теплонапряженных стенок. Эти данные использовались для прогнозирования ресурса работы плазмотрона путем экстраполяции. Измерение веса электродов и конфузоров после каждого цикла производились на электронных весах с погрешностью не более 0,01 г. Режим работы плазмотрона варьировался заданием дуговых токов и расхода газа, а также зависел от диаметра выходного сопла. Эксперименты проводились с тремя разным диаметрами выходных сопел: $d_c = 14$ мм, 20 мм, 30 мм.

В таблице 1 представлены осредненные данные по удельной эрозии медных электродов $m_i = m_r/I$, где m_i – удельная скорость эрозии (микрограммы на Кулон), m_r – массовая скорость эрозии; I – фазный ток. Данные представлены для трех серий экспериментов с различными диаметрами сопел. Для каждого диаметра d_c приведено по три значения m_i , которые измерены при различных уровнях дуговой мощности N_d . Для этих данных оценивался далее ресурс работы t_p .

Таблица 1

Осредненные данные по результатам экспериментов

№ п/п	d_c , мм	N_d , кВт	I , А	G_b , г/с	P_k , МПа	T_0 , К	m_i , мкг/К	t_p , час
1	14	570	180	74	0,76	3930	15	74
2	14	900	254	101	1,1	4200	25	30
3	14	1100	250	156	1,65	3600	34	22
4	20	695	198	93	0,49	3830	5,5	180
5	20	800	276	90	0,5	4110	6,3	111
6	20	1030	264	123	0,67	4030	9	82
7	30	750	174	129	0,33	3370	1,62	690
8	30	960	315	108	0,26	4100	1,7	362
9	30	1200	373	127	0,42	4170	3,4	153

На рис. 2 приведены зависимости m_i от мощности для различных диаметров сопла. Как видно, величина d_c оказывает определяющее влияние на удельную скорость уноса материала электрода.

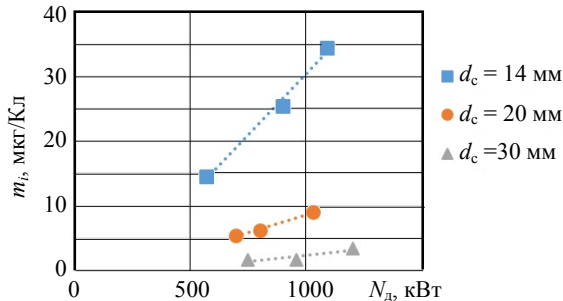


Рис. 2. Зависимость удельной эрозии электродов от мощности для различных диаметров сопла.

Так, при фиксированной электрической мощности 1 МВт при уменьшении диаметра d_c с 30 мм до 14 мм m_i увеличивается примерно на порядок. Это связано с интенсификацией теплообмена со стенками дугового канала при росте давления в плазмотроне. На рис. 2 видно, что при фиксированном диаметре сопла зависимость m_i от N_d имеет практически линейный характер. Характер зависимости, однако, может нарушаться при изменении характера течения в плазмотроне (соотношения расходов подаваемого газа, интенсивности вихря в канале, уровня пульсаций давления), скорости вращения дуги магнитным полем, при изменении конструкции и материала электродов, а также при наличии на них покрытий. Скорость уноса также зависит от электрических свойств нагретой газовой среды. Принципиально электроды могут работать без уноса, и такие факты были зарегистрированы в некоторых циклах наших испытаний. Оставаясь, однако, в рамках параметров, представленных в табл. 1, можно оценить ресурс работы электродов и конфузоров t_p исходя из надежности стенок дугового канала. В соответствии со схемой на рис. 3, величина t_p определяется из соотношения:

$$t_p \approx \frac{\rho \pi D L_{\text{эф}} H}{m_\tau}, \quad (1)$$

где ρ – плотность, остальные обозначения приведены на рис. 3, $m_\tau = m_i \times I$ – массовая скорость эрозии материала.

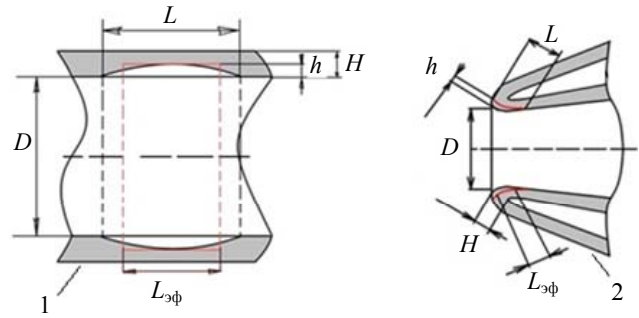


Рис. 3. Эрозия материала с поверхности электрода (1) и конфузора (2).

В формуле (1) сделан ряд допущений. Область эрозии электрода, ограниченная криволинейной поверхностью длиной L , заменена цилиндрической с эффективной длиной $L_{\text{эф}}$. Это допущение оправдано, так как зона эрозии имеет размер, по данным измерений, порядка 10 см, значительно превышая текущую толщину эрозии h и толщину стенки H , равную 6 мм.

Приведенные в табл. 1 значения m_i соответствуют осредненной по времени скорости эрозии. Как показано в работе [2], скорость m_i по мере уноса материала электрода увеличивается. Это связано с тем, что оптимальная толщина стенки электрода выбирается из условия согласования фаз тока дуги и магнитного поля. В реальных условиях толщина стенки непрерывно уменьшается, что приводит к рассогласованию тока и магнитного поля по фазе. В [2] показано, что при уменьшении толщины стенки на 70 %, величина m_i увеличивается примерно в два раза, а затем, по мере уменьшения толщины, скорость эрозии стабилизируется из-за снижения температуры рабочей поверхности охлаждаемой стенки (уменьшается перепад температур по толщине стенки). Так как в описываемых ресурсных испытаниях электроды использовались многократно, при этом их толщина уменьшалась до 50 % от исходной, это позволяет для расчета ресурса использовать осредненную величину m_i .

Результаты расчетного прогнозирования ресурса t_p приведены для электродов на рис. 4, а для конфузоров в табл. 2.

Как видно, минимальные значения ресурса имеют место при минимальном диаметре сопла. Так, на мощности $N_d \approx 1$ МВт величина ресурса электрода для $d_c = 14$ мм составляет

около 30 часов. При этом давление в камере обеспечивается на уровне $P_k = 1,6$ МПа. Такой режим работы плазмотрона с высоким давлением P_k используется обычно при проведении термогазодинамических испытаний стойкости различных конструкционных материалов при воздействии высокоэнтальпийных потоков. Длительность таких испытаний, как правило, не превышает десятков секунд.

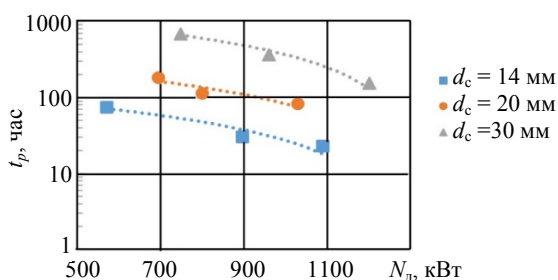


Рис. 4. Прогноз ресурса электродов в зависимости от мощности для различных диаметров сопла.

На той же мощности $N_d \approx 1$ МВт ресурс электродов с соплом $d_c = 30$ мм увеличивается до 400 часов при давлении в камере $P_k = 0,26$ МПа. Такой режим работы обычно используется в различных плазмохимических технологиях. При снижении мощности до 750 кВт ресурс электродов может быть увеличен до примерно 690 часов.

Кроме электродов, критически важным узлом плазмотрона являются конфузоры, которые представляют собой сужающиеся участки дуговых каналов на входе в общую камеру плазмотрона (см. рис. 1). Конфузоры являются очень теплонапряженными элементами дуговых трактов плазмотронов в силу целого ряда факторов, отмеченных выше. При сохранении стабильного охлаждения и отсутствии замыкания на них дугового разряда,

конфузоры могут работать без уноса, что подтверждают результаты измерений их массы в ряде циклов испытаний. Все же полностью исключить замыкания дуги на конфузор пока не удается — это явление носит достаточно случайный характер, происходит в виде коротких импульсов тока на конфузор и связано, видимо, с пульсациями давления в камере, которые вызывают резкое изменение электрического сопротивления дугового канала.

Одним из путей увеличения ресурса конфузоров является установка специальных легкосменных шайб в самом теплонапряженном месте конфузора, то есть изготовление его составным. При этом сам конфузор с рубашкой охлаждения имеет неограниченный ресурс. Шайбы можно изготавливать как из высокотемпературных сплавов, так и из высокотемпературной керамики. Использование керамических шайб позволяет избежать возможного замыкания дуги на конфузоры, обеспечивая замыкание дуг в нулевой точке (находящейся газе, в общей камере).

В наших испытаниях измерения скорости эрозии конфузоров проводилось в широком диапазоне изменения мощностей и токов: $N_d = 0,55-1$ МВт, $I = 170-260$ А. Было установлено, что, в отличие от электродов, удельная скорость эрозии материала конфузоров не обнаруживает явной зависимости от давления в плазмотроне (от диаметров использованных сопел) и величины дуговой мощности. Величина m_i в указанном диапазоне изменения параметров для медных конфузоров с точностью $\pm 15\%$ колеблется в диапазоне $m_i \sim 1,5 \times 10^{-6}$ г/Кл (табл. 2). Использование вместо меди для изготовления конфузоров бронзы БРХ1 приводит к уменьшению значений m_i до величины 3×10^{-7} г/Кл.

Таблица 2

Данные по стойкости конфузоров

№	Конструкция конфузора	Материал конфузора	m_i , г/Кл	t_p , час
1	Цельный	Медь М1	$1,5 \times 10^{-6}$	70
2	Составной	Бронза БРХ1	3×10^{-7}	350

Для прогнозирования ресурса конфузоров используем формулу, аналогичную (1), в которой параметры D , $L_{эф}$, H находятся в соответствии с рис. 3. Так, для конфузора из

бронзы на мощности 0,75 МВт с соплом $d_c = 3$ см значение тока составляло $I = 175$ А. По результатам обмера уносимой торцевой поверхности, величина $L_{эф}$ составляет ~ 1 см, а

толщина $H \sim 0,8$ см. Тогда прогнозный ресурс составит $t_p \sim 350$ часов. В то же время, ресурс медного конфузора при этих параметрах составляет 70 часов.

Подводя итог выполненным экспериментальным исследованиям ресурсных характеристик плазмотрона при различных режимах работы, необходимо подчеркнуть, что стойкость элементов дуговых каналов (электродов и конфузоров) не коррелирует друг с другом. Например, пульсации давления в плазмотроне (и связанные с ними пульсации дуги в пространстве) увеличивают ресурс электродов и снижают ресурс конфузоров. Модернизация конструкции электродов и конфузоров, которая проводилась при выполнении данного исследования, позволила сделать детали дугового канала, которые подвергаются уносу, более простыми и дешевыми в изготовлении при одновременном увеличении их ресурса. Величины ресурса электродов и конфузоров, которые получены на основе точных экспериментальных измерений, превышают сотни часов при работе плазмотрона на мегаваттном уровне мощности, что открывает возможности широкого технологического применения плазмотронов данного класса.

Заключение

Проведено исследование ресурсных характеристик наиболее теплонапряженных узлов плазмотрона переменного тока «Звезда» – электродов и конфузоров – в диапазоне дуговой мощности 0,5–1,2 МВт. Установлены основные закономерности, влияющие на ско-

рость эрозии. В частности, на ресурс электродов существенно влияет давление в плазмотроне. На основе проведенных измерений скорости эрозии сделаны прогнозные оценки ресурса. Показано, что при правильном выборе режима работы плазмотрона и конструкции элементов дуговых каналов ресурс электродов может достигать 690 часов, а ресурс конфузоров превышает 300 часов. Учитывая, что конструкция плазмотрона «Звезда» позволяет легко заменять данные детали, плазмотрон данного класса представляется удобным для использования в промышленных технологических процессах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коротеев А. С., Миронов В. М., Свирчук Ю. С. // Плазмотроны: конструкции, характеристики, расчет. – М.: Машиностроение, 1993.
2. Svirchuk Y. S., Golikov A. N. // IEEE Transaction on Plasma Science. 2016. Vol. 44. № 12. P. 3042.
3. Голиков А. Н., Зайкин Н. С., Свирчук Ю. С. Патент РФ на изобретение № 2577332, 20.03.2016.
4. Кошлаков В. В., Ребров С. Г., Голиков А. Н., Федоров И. А., Морозов А. Г., Ильюша А. В. // Тепловые процессы в технике. 2020. Т. 12. № 8. С. 374.
5. Голиков А. Н., Кочетков Ю. М., Полянский М. Н., Свирчук Ю. С. // Тепловые процессы в технике. 2009. Т. 1. № 9. С. 390.
6. Кузнецов В. Е., Сафронов А. А., Ширяев В. Н., Васильева О. В., Дудник Ю. Д. // Прикладная физика. 2019. № 3. С. 24.
7. Михайлов Б. И. // Теплофизика и аэромеханика. 2007. Т. 14. № 3. С. 449.
8. Аньшаков А. С., Тимошевский А. Н., Урбах Э. К. // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. Наук. 1988. Вып. 2. № 7. С. 69.
9. Muntz R. J., Stente R. N., Droet M. G. // Pure & Appl. Chem. 1992. Vol. 64. № 5. P. 657.

PACS: 52.75.Hn

Resource characteristics of the alternating current plasma torch "Zvezda"

V. V. Koshlakov, S. G. Rebrov, A. N. Golikov, and I. A. Fedorov

The State Scientific Centre Keldysh Research Center
8 Onegskayast., Moscow, 125438, Russia
E-mail: rebrov_serгей@mail.ru

Received June 11, 2021

The article presents the results of the study of material entrainment (erosion) of the most heat-stressed nodes of the three-phase alternating current plasma torch "Zvezda" of megawatt pow-

er: electrodes and confusers. The data on entrainment were obtained by weighing the studied nodes after their cycles of operation at fixed modes. Air was used as the working fluid. The operating modes of the plasma torch varied in the ranges of arc power 0.5–1.2 MW, currents 160–400 A, gas flow 70–170 g/s. When using different output nozzles, the pressure in the plasma torch varied from 0.2 to 1.65 MPa. The influence of various parameters of the operating mode on the service life of the plasma torch is shown. Using the obtained data on the erosion of electrodes and confusers, their resource was evaluated.

Keywords: AC plasma torch, three-phase plasma torch, electric arc, resource, electrodes, erosion.

DOI: 10.51368/1996-0948-2021-4-32-39

REFERENCES

1. A. S. Koroteev, V. M. Mironov, and Y. S. Svirchuk, *Plasmatrons: constructions, characteristics, calculation.* (Mashinostroenie, Moscow, 1993) [in Russian].
2. Y. S. Svirchuk and A. N. Golikov, *IEEE Transaction on Plasma Science* **44** (12), 3042 (2016).
3. A. N. Golikov, N. C. Zaikin, and Y. S. Sverchuk, Patent of the Russian Federation for the invention No. 2577332, 20.03.2016.
4. V. V. Koshlakov, S. G. Rebrov, A. N. Golikov, I. A. Fedorov, A. G. Morozov, and A. V. Ilyusha, *Thermal processes in engineering* **12** (8), 374 (2020).
5. A. N. Golikov, Y. M. Kochetkov, M. N. Polyansky, and Y. S. Svirchuk, *Thermal processes in technology* **1** (9), 390 (2009).
6. V. E. Kuznetsov, A. A. Safronov, V. N. Shiryaev, O. V. Vasilyeva, and Y. D. Dudnik, *Applied Physics*, No. 3, 24 (2019) [in Russian].
7. B. I. Mikhailov, *Teplofizika i aeromekhanika* **14** (3), 449 (2007).
8. A. S. Anshakov, A. N. Timoshevsky, and E. K. Urbach, *Izv. SO AN SSSR. Ser. tehn.* Issue 2, No. 7, 69 (1988).
9. R. J. Muntz, R. N. Stone, and M. G. Drouet, *Pure&Appl. Chemistry* **64** (5), 657 (1992).