

УДК 523.924

В.С. Кривцов, С.И. Планковский

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОРЕСУРСНЫХ СИЛЬНОТОЧНЫХ ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ ПЛАЗМОТРОНОВ

Проведен анализ основной причины, сдерживающей массовое использование плазменных технологий, созданных и отработанных на экспериментальных установках, – отсутствия плазмотронов с достаточным уровнем мощности. Предложены направления работ, которые позволят изменить ситуацию в лучшую сторону.

электродуговой плазмотрон, пламенные технологии

Введение

Реализация новых плазменных технологий, например, плазменной металлургии, переработки отходов, крупнотоннажной плазмохимии требует разработки плазмотронов с единичной мощностью до 10 МВт. Не менее важными факторами, определяющими возможность создания эффективных плазменных технологий, являются надежность и ресурс плазмотронов. Интуитивное стремление к созданию плазменного оборудования с максимальным ресурсом не всегда является обоснованным для конкретных технологических процессов. На наш взгляд, для каждого из возможных применений плазменного оборудования целесообразно определять необходимый уровень ресурса исходя из цикличности работы всей технологической цепочки, в которой оно используется. Так, например, обычно считается, что современное металлургическое производство имеет непрерывный цикл. Однако, такое мнение при более тщательном анализе оказывается не совсем верным. Например, на современных заводах установлено единое время для проведения регламентных работ на всем технологическом оборудовании. Очевидно, что в случае использования на таком производстве плазменного оборудования, его гарантированный ресурс должен составлять величину, кратную межрегламентному циклу, который обычно составляет величину порядка тысячи часов.

Кроме того, условия конкретного производства могут выдвигать дополнительные требования к плазменному оборудованию, исходя из условий безопасной эксплуатации.

Несмотря на то, что исследования в области создания мощных плазмотронов интенсивно ведутся на протяжении многих лет, до сих пор не создано оборудование, в полной мере удовлетворяющее требованиям промышленности. Именно отсутствие плазмотронов с достаточным уровнем мощности, надежности и ресурса в настоящее время считается основной причиной, сдерживающей массовое использование плазменных технологий, созданных и отработанных на экспериментальных установках [1, 2].

В настоящей работе сделана попытка анализа причин такого положения и предлагаются направления работ, реализация которых, по мнению авторов, позволит изменить ситуацию в лучшую сторону.

Плазмотроны с охлаждаемыми катодами

Говоря о ресурсе плазмотрона необходимо учитывать, что его величина определяется ресурсом отдельных узлов. В процессе работы плазмотрона наиболее интенсивному износу подвергается катод, ресурс анода выше примерно в 2 раза. Плазмотрон может выйти из строя также из-за прогара сопла или нарушения изоляционных свойств межэлектродных вставок. Надежность работы плазмотрона определяется помимо его ресурса еще и степенью надежности оборудования систем электропитания, охлаждения, подачи плазмообразующего газа.

В конструкции электродуговых плазмотронов при работе дуги в режиме с пятном чаще всего используются два способа повышения ресурса электродов. Первый основан на использовании эффекта нестационарности теплового воздействия – рассредоточении теплового потока при организации быстрого движения опорного пятна по поверхности высокотеплопроводного «холодного» материала электрода (чаще всего меди или ее сплавов). Второй способ – применение «горячих» электродов, выполненных из тугоплавких материалов с умеренным охлаждением. В этом случае используется эффект расширения катодного пятна, снижения плотности тока, облегчения теплового режима за счет уменьшения доли ионного тока и

выноса тепла из катода с термоэлектронами. Оба способа, снижая эрозийный износ электродов, не могут, однако, полностью его исключить.

В качестве примера первого подхода рассмотрим лучший из созданных на сегодня в мире плазмотронов, выпускаемый фирмой Westinghouse Plasma Co. (США) [3]. Для максимального рассредоточения теплового потока по поверхности электродов в плазмотронах фирмы используется комбинированный метод раскрутки дуги под действием электромагнитных и газодинамических сил и осевое смещение ее ножек по поверхности электродов. Плазмотроны фирмы Westinghouse Plasma Co. [4, 5] имеют трубчатые водоохлаждаемые электроды 1, 2 (рис. 1). Вокруг электродов размещены электромагниты 3, обеспечивающие вращение дуги со скоростью свыше 1000 оборотов в секунду.

Зазор между электродами выполнен настолько малым, что при используемых параметрах питающего тока ($U = 4000$ В) гарантировано обеспечиваются пробой и первоначальное образование дуги в зазоре. В зазор подается плазмообразующий газ с давлением, обеспечивающим очень высокие скорости потока. Газовым потоком дуга 4 выносится на цилиндрические поверхности электродов, при этом электромагниты обеспечивают интенсивную раскрутку дуги. Когда газовый поток растягивает дугу до длины, при которой ее горение при используемом напряжении питания становится невозможным, дуга обрывается и тут же вновь образуется в зазоре между электродами. Таким образом, следы дуги на поверхности электродов не локализуются, а занимают достаточно протяженную область. Фирмой Westinghouse Plasma Co. производятся плазмотроны мощностью до 4 МВт, имеет-

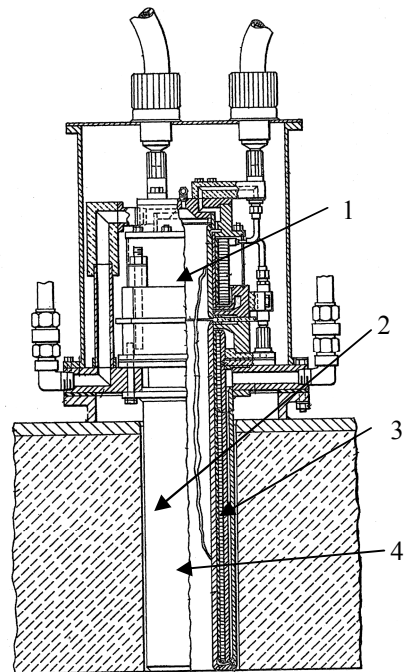


Рис. 1. Плазмотрон фирмы Westinghouse Plasma Co.

ся опыт их применения при реализации более 10 проектов в области металлургии, газификации и переработки отходов. Для некоторых образцов удалось поднять ресурс до 3500 часов, причем при использовании воздуха в качестве плазмообразующего газа.

В принципе, такой уровень ресурса и мощности достаточен для большого количества практических задач. Однако, даже такие выдающиеся результаты не привели к массовому внедрению плазменных технологий. Причина этого – высокий уровень рабочего напряжения.

Из-за этого выход плазматрона из строя часто происходит не по причине прогорания электродов, а из-за пробоя по межэлектродной вставке. В межэлектродный зазор попадает пыль из окружающей атмосферы, частички материала электродов. Даже незначительный уровень таких загрязнений при высоком рабочем напряжении может привести к пробое и непрогнозируемому выходу плазматрона из строя. Таким образом, фактически не может быть обеспечено одно из главных требований – гарантированная безотказность в течение установленного времени.

Кроме того, для целого ряда промышленных применений использование высоковольтных устройств в составе оборудования прямо запрещается нормами техники безопасности. Поэтому необходимо рассматривать путь повышения единичной мощности плазматрона за счет увеличения тока дуги при относительно низких уровнях напряжения на разряде.

С ростом силы тока дуги ресурс охлаждаемых электродов резко снижается. Парадокс ситуации в том, что чем выше интенсивность охлаждения электродов, тем сильнее сжимается пятно дуги, выше плотность тока, тепловой поток в пятне и эрозия электродов. При этом даже самое интенсивное перемещение дуги по поверхности электродов становится неэффективным.

Поэтому вполне логично выглядели попытки повышения рабочих значений силы тока в плазматроне за счет повышения температуры электродов. Однако все попытки создания таких конструкций, по сути, оказались безуспешными. Ни в одной из них не удалось даже приблизиться к показателям ресурса лучших плазматронов с «холодными» электродами. На наш взгляд, это связано, по крайней мере, с двумя причинами.

Во-первых, практически все исследователи игнорируют факт изменения эмиссионных свойств материалов в зависимости от состава атмосферы.

ры в приэлектродном пространстве. Многие авторы (см., например, с. 212 в [6]) приводят таблицы со значениями работы выхода, используют их в дальнейших выкладках, не учитывая, что эти данные получены при испытаниях материалов в условиях высокого вакуума. В то же время, известно, что для любых материалов эмиссионные свойства ухудшаются даже при незначительном присутствии в приэлектродном пространстве активных газов, а при достижении критических значений их парциального давления - падают в десятки раз. На рис. 2 приведен характерный вид кривой изменения эмиссии при повышении парциального давления активных газов, полученный при испытаниях вольфрам-бариевых катодов на отравляемость при различных температурах (см. [7] с. 235). Аналогичные по характеру зависимости были получены для гексаборида лантана в [8].

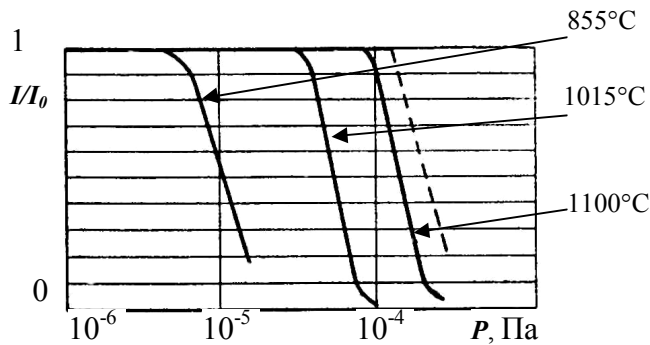


Рис. 2. Изменение эмиссии катода при воздействии воздуха:
 P – давление воздуха; I_0 – начальное значение тока;
 I – значение тока после отравления

Те же ошибки допускаются многими авторами при математическом моделировании приэлектродных процессов. При описании катодных процессов общепринятой (см., например, с. 64 в [9]) является запись выражения для плотности тока эмитируемых электронов в виде:

$$j_e^{эм} = AT_k^2 \exp \left(- \frac{e\phi_{эф}}{kT_k} \right),$$

где $\phi_{эф} = \phi_w - \Delta\phi$; A, ϕ_w – константы; $\Delta\phi = \sqrt{eE_k}$ – поправка Шоттки.

С учетом вышесказанного, очевидно, что для моделирования реальных процессов такой подход не корректен. Не удивительно, что результаты численного моделирования процессов эрозии с такими допущениями от-

личаются от экспериментальных данных на порядки. Для более строгих расчетов необходимо принимать $\varphi_{эф}$ в виде функции, зависящей от состава атмосферы, температуры поверхности, а для расчета активированных катодов – еще и от времени.

На практике игнорирование зависимости работы выхода от состава атмосферы приводит к следующему. Для поддержания горения дуги требуется обеспечить определенный уровень эмиссии электронов. Элементарный анализ показывает, что при использовании в плазмотронах инертных газов технической очистки содержание отравляющих примесей в прикатодном пространстве превосходит критические значения для всех известных термоэмиссионных материалов. Поскольку работа выхода электронов с отравленной поверхности катода существенно выше расчетной, горение дуги становится возможным только при сильном сжатии пятна. Это приводит к возрастанию удельных тепловых потоков в разы, перегреву эмиттера (иногда вплоть до температуры плавления) и, соответственно, к катастрофической эрозии катода.

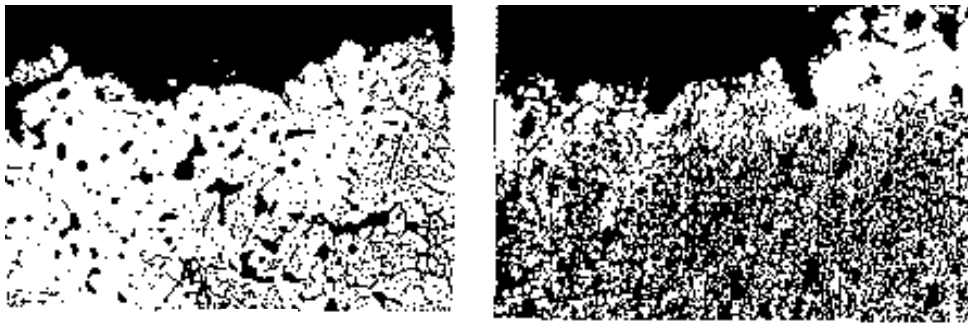
Второй причиной, не позволившей создать высокоресурсные образцы плазмотронов с «горячими» электродами является неправильный выбор материала электродов. До настоящего времени в конструкции «горячих» катодов наиболее часто использовались эмиттеры на основе вольфрама с присадкой окисей редкоземельных элементов (РЗЭ). Принцип их работы заключается в постепенной диссоциации или восстановлении соединений РЗЭ и выходом атомов на рабочую поверхность катода, что приводит к снижению работы выхода. Одним из материалов данной группы является вольфрам с присадкой окиси иттрия ($W + 10\% Y_2O_3$). В работах Б.А. Архипова [11] проведены комплексные исследования с целью определения ресурса и стабильности характеристик таких катодов при длительных испытаниях.

В качестве объекта исследования автором рассматривались катоды электроракетных двигателей. На основании полученных данных был сделан вывод о неперспективности использования данного материала. В ходе ресурсных испытаний было зафиксировано быстрое (в течение нескольких десятков часов) снижение эмиссионных характеристик материала. Для объяснения данного факта автором было сделано предположение,

что эмиссионные характеристики в ходе испытаний ухудшаются из-за выработки активной присадки Y_2O_3 . Проведенный металлографический анализ (рис. 3) подтвердил это предположение. В зоне привязки дуги было выявлено значительное снижение концентрации Y_2O_3 , а на поверхности катода – образование пленки чистого вольфрама. В периферийных областях эмиттера содержание Y_2O_3 осталось на исходном уровне.

При дальнейших исследованиях наблюдался рост толщины ободка чистого вольфрама с течением времени, что привело к существенному снижению скорости диффузионной доставки Y_2O_3 , к рабочей поверхности катода и к постепенному спаданию его эмиссии.

Б.А. Архипов указывает, что такой же негативный результат следует ожидать для других сплошных композиционных катодов на основе вольфрама с присадками окиси тория, окиси гадолиния, окиси осмия и других окислов РЗЭ, а также сплошных карбидметаллических кермет-катодов, представляющих композиции $ZrC - W$, $HfC - W$, $ZrC - Mo$, других материалов такого типа.



а

б

Рис. 3. Микроструктура $W + Y$ эмиттера [10]:
а – до испытаний; б – после испытаний

В работе [12] в качестве одного из перспективных методов повышения рабочего значения силы тока электродуговых плазмотронов рассматривается расщепление приэлектродных участков дуги с соответствующим снижением токовой нагрузки в образующихся пятнах привязки. Для достижения такого эффекта вместо одного стержня из тугоплавкого материала в водоохлаждаемую обойму катода запрессовывают несколько.

экспериментов авторам удалось определить условия образования устойчивых режимов работы плазмотрона с расщепленной дугой.

Тем не менее, полученные в [12] результаты не достаточны для оценки перспектив предложенного авторами подхода. Так, в работе содержатся данные о том, что в ходе экспериментов удалось поднять рабочий ток с 400 А в базовой конструкции до 1000 А в модернизированной. Однако, ресурсных испытаний авторами не проводилось. По нашему мнению результат таких испытаний предопределен, поскольку простое снижение плотности тока в пятне не устраняет ни одной из причин снижения ресурса электродов, упомянутых выше.

Радикального улучшения ситуации можно добиться при переходе от режимов горения дуги с пятном к режимам с распределенной, диффузионной привязкой. В качестве основных направлений создания таких силовых плазмотронов можно считать:

- 1) воздействие дополнительного потока плазмы на приэлектродный участок дуги (плазменный катод);
- 2) применение пористых катодов с активирующими присадками, в которых реализуется диффузная зона контакта дуги с электродом.

Плазмотроны с плазменным катодом

При подаче готовой плазмы в приэлектродную область при определенных параметрах происходит перестройка катодных процессов, приводящая к диффузному режиму привязки дуги [12]. В этом режиме невозможно обнаружить какую-либо выделенную зону, которую можно было бы идентифицировать как зону контакта дуги с электродом. Осциллограммы тока и напряжения на дуге регистрируют лишь пульсации источника питания, что свидетельствует о стационарном характере привязки дуги к электроду.

Газ, проходящий через вспомогательную дугу, нагревается до температуры $(10 \dots 12) \cdot 10^3$ К и попадает в приэлектродную область. Это гарантирует наличие здесь такого количества носителей электричества, которого достаточно для стабильного протекания тока дуги при сравнительно низкой температуре поверхности электрода. В результате резко снижается эрозия электрода и повышается стабильность горения дуги.

В ходе экспериментов [13] было установлено, что для исследованной конструкции плазмотрона с плазменным катодом ток основной дуги может в 15 раз превышать ток вспомогательной. Авторам удалось достичь уровня тока основной дуги до 6000 А. При этом, следы эрозии на основном электроде отсутствовали.

В ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины были созданы опытно-промышленные образцы высокоточных плазмотронов с плазменным катодом, созданы плазменные нагревательные комплексы мощностью до 6 МВт, которые эксплуатировались в составе оборудования для вакуумно-дугового переплава и внепечной обработки стали.

Однако, несмотря на резкое повышение ресурса основного электрода, ресурс таких плазмотронов был крайне низким (порядка 200 часов). Причина этого очевидна. В созданных конструкциях плазмотронов с плазменным катодом (рис. 4) вспомогательная дуга постоянного тока горит между электродом 1 и полым основным электродом 2. Вспомогательный электрод 1 представляет собой стержень из активированного вольфрама. При силе тока вспомогательной дуги в 500 А, которая необходима для обеспечения тока основной дуги в 6000 А, с вспомогательным электродом возникают все вышеописанные проблемы. Именно вспомогательный электрод является "слабым звеном" данной конструкции, определяющим величину ресурса плазмотрона.

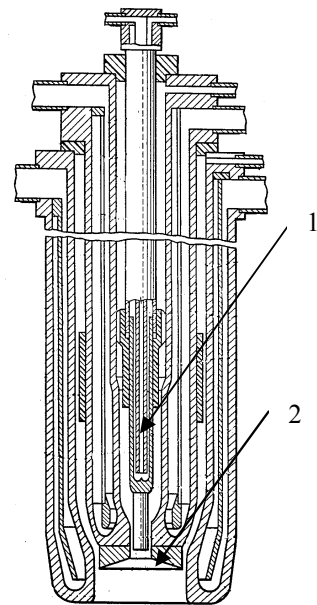


Рис. 4. Плазмотрон с плазменным катодом

Применение для изготовления катодов высокоточных плазмотронов высокоэмиссионных материалов типа гексаборида лантана невозможно. Эти материалы чрезвычайно чувствительны к термоударам и при работе без предварительного достаточно медленного разогрева разрушаются через несколько циклов.

Плазмотроны с пористым катодом

Основной недостаток сплошных активированных катодов (недостаточная скорость диффузии присадок на поверхность катода) может быть устранен при применении катодов на основе пористых тугоплавких материалов. В течение некоторого времени в НИИ Механики МГУ (например, [14]) предпринимались активные попытки создания таких катодов для высокопоточных плазмотронов.

В основу разрабатываемых конструкций катодов закладывалась принудительная подача в область поверхности катода паров щелочных металлов (натрия или калия). Такая подача осуществлялась либо путем соответствующих добавок в аргон, либо в результате диффузии паров металла через тугоплавкую пористую матрицу. По заявлениям авторов [14] им удалось создать катоды на токи до 10 кА стабильно работающие в режиме диффузной привязки. При этом фиксировавшиеся тепловые потоки в катод, работающий при диффузной привязке разряда стоком 1200 А, оказывались на порядок ниже, чем в пятне контрагированной дуги с током 200 А. В этой же работе делается вывод о принципиальной возможности создания нерасходуемых электродов для плазменной техники на токи до 100 кА.

Несмотря на такие оптимистичные предположения, так и не появились конструкции, успешно работающие на описанном принципе. Это могло произойти по следующим причинам. Во-первых, при создании систем принудительной подачи паров металла возникают серьезные трудности, детально описанные в [11] применительно к катодам электроракетных двигателей. Во-вторых, всегда существует опасность запыления конструкции плазмотрона неионизированными парами металла. Их осаждение на диэлектрические детали может вызвать короткое замыкание и непрогнозируемый выход плазмотрона из строя. В-третьих, сохраняются все вышеописанные проблемы, касающиеся отравления эмиссионного материала. Авторы [14] даже не упоминают о этой проблеме. Следовательно, скорее всего они не учитывают это явление так же, как и большинство других исследователей. А от проблемы никуда не деться - даже при принудительной подаче паров металла в катод плазмотрон нужно иногда вы-

ключать. Естественно, его внутреннее пространство заполнится воздухом. Отравление поверхности катода при этом неизбежно.

Наверняка есть и другие причины, не позволившие добиться успеха в области создания сильноточных катодов, работающих на парах щелочных металлов. Тем не менее, сам факт неудачи является очевидным, подтверждением чего является само появление настоящей работы через 18 лет после публикации работы [14].

Нам представляется перспективным другой путь, который оказался успешным при создании катодов космического применения. В качестве эмиттера таких катодов можно использовать пористый вольфрам пропитанный активатором (сложными оксидами скандата или гафната бария). Указанные материалы обладают прекрасными эмиссионными свойствами, имеют хорошие характеристики отравляемости.

В Национальном аэрокосмическом университете "ХАИ" отработана технология изготовления пропитанных эмиттеров различных размеров, в том числе для изготовления катодов на токи до 2000 А. Проведенные эксперименты позволяют утверждать, что при условии обеспечения требуемой чистоты плазмообразующего газа (аргона) можно ожидать значений ресурса таких катодом порядка 10^3 ч. В тоже время, при создании сильноточных катодов на основе пропитанного пористого вольфрама возникли дополнительные проблемы, связанные с обеспечением его механической прочности. При выводе катода на рабочий режим по току его разогрев происходит не равномерно. В ходе экспериментальных запусков наблюдались переходные режимы с несколькими пятнами привязки дуги, перемещающимися по поверхности катода. Возникающие при этом поля температур и связанные с ними напряжения имеют неравномерный и нестационарный характер. Пористая матрица эмиттера под неоднократным воздействием таких нагрузок при запусках плазмотрона может разрушаться.

Направления исследований

С учетом вышеизложенного можно сделать следующие выводы. Наиболее перспективным путем создания сильноточных высокоресурсных плазмотронов является применение "горячих" электродов в режиме горения ду-

ги с диффузной привязкой. Для того чтобы такие плазмотроны удовлетворяли требованиям промышленности необходимо решить ряд задач.

1. Необходимо обеспечить требования к составу атмосферы в полости плазмотрона, определяемые свойствами применяемых эмиссионных материалов. Эта задача может решаться двумя способами - либо поиском новых эмиссионных материалов значительно менее чувствительных к отравлению, либо применением комплекса мер в области разработки систем подачи плазмообразующего газа, газодинамического проектирования полостей плазмотронов и выбора режимов их работы с целью обеспечения допустимых значений концентрации активных газов в прикатодном пространстве.

Решение данной задачи потребует проведения комплекса работ:

- разработки новых эмиссионных материалов с повышенной стойкостью к отравляемости;
- экспериментальных исследований эмиссионных материалов для определения характеристик отравляемости;
- исследований газодинамических процессов в многокомпонентной газовой среде в полости плазмотрона с учетом начального состава атмосферы, процессов нагрева газового потока, газовыделения и диффузии активных газов во встречном потоке плазмы;
- разработки эффективных способов очистки плазмообразующих газов от активных газов до заданной степени чистоты.

2. Необходимо обеспечить относительную стабильность эмиссионных свойств катода в процессе эксплуатации при сохранении его механической прочности. Данная задача также имеет несколько вариантов решения. Можно пойти по пути создания катодов на основе пористой губки из тугоплавких материалов, пропитанной высокоэмиссионными составами. Альтернативным вариантом является разработка катодов на основе сплошных высокоэмиссионных материалов со сложным армированием.

Для достижения успеха в решении этих задач необходимо, по крайней мере, проведение следующих работ:

- экспериментальных исследований эмиссионных материалов для определения характеристик термостойкости, скорости испарения и диффузии;

- исследований теплового и теплонапряженного состояний электродов плазмотронов с учетом нестационарности процессов нагрева на этапах запуска, переходных и рабочих режимах;
- разработки алгоритмов запуска плазмотронов с учетом процессов, возникающих при нестационарном разогреве элементов их конструкции;
- комплексных исследований в области технологических процессов изготовления электродов плазмотронов;
- ресурсных испытаний модельных и натуральных образцов плазмотронов.

Конечно же, приведенный перечень не является полным. Для создания промышленных сильноточных плазмотронов необходимо выполнить огромное количество работ и в других областях: создании специализированных источников питания, охлаждения, подачи плазмообразующего и защитного газа, в разработке автоматизированных систем управления и т.д. Однако, без подтверждения принципиальной возможности достижения необходимого результата, что собственно и является целью решения сформулированных задач, выполнение других исследований теряет смысл. В то же время, авторы убеждены в том, что нет никаких фундаментальных причин, которые бы не позволяли добиться успеха при движении по намеченному пути.

В заключение сделаем еще одно замечание. Может показаться, что декларируемая нами необходимость использования для защиты катодов инертных газов высокой степени очистки существенно снижает возможности применения таких плазмотронов в промышленности. Это не так поскольку существует апробированные на практике конструкции плазмотронов переменного тока с замыканием дуги на среднюю точку плазмы (см., например [15]). В этих плазмотронах рабочая камера, в которой нагревается рабочий газ конструктивно удалена от электродов, которые могут обдуваться защитным газом. Очевидно, что при соблюдении тех требований, о которых сказано выше, плазмотроны такого типа не имеют ограничений на тип рабочего газа.

Литература

1. Плазменная металлургия. Т. 8. Низкотемпературная плазма / Ю.В. Цветков, А.В. Николаев, С.А. Панфилов и др. – Н-ск: Наука. 992. – 267 с.

2. Плазмохимическая технология. Т. 4. Низкотемпературная плазма / В.Д.Пархоменко, П.И.Сорока, Ю.И. Краснокутский и др. – Н-ск: Наука., 1991. – 392 с.

3. Кривцов В.С., Планковский С.И. Современное состояние и перспективы создания высокоресурсных плазменных генераторов // Технологические системы. – К.: УкрНИИАТ. – 2004. – № 1. – С. 11 – 16.

4. Charles B. Wolf, Maurice G. Fey. Пат. 3705975 (США). Self-Stabilizing arc heater apparatus. – Оpubл. 2.03.1970 г.

5. Charles B. Wolf, Shyam V. Dighe, Paul E. Martin, Raymond F. Taylor, William J. Melilli. Пат. 5004888 (США). Plasma torch with extended life electrodes. – Оpubл. 21.12.1989 г.

6. Прикладная динамика термической плазмы / М.Ф. Жуков, А.С. Коротеев, Б.А. Угрюмов. – Н-ск: Наука, 1975. – 243 с.

7. Термоэлектродные катоды / Г.А. Кудинцева, А.И. Мельников, А.В. Морозов, Б.П. Никонов. – М.: Энергия, 1966. – 367 с.

8. Высокотемпературные электродные материалы / Ю.А. Куницкий, В.В. Морозов, В.Я. Шлюко. – К.: Вища школа, 1977. – 230 с.

9. Математическое моделирование катодных процессов. Т. 11. Низкотемпературная плазма / А.М. Зимин, И.П. Назаренко, И.Г. Паневин, В.И. Хвесюк. – Н-ск: Наука, 1993. – 194 с.

10. Термохимические катоды / М.Ф. Жуков, Г.-Н.Б. Дандарон, А.В. Пустогаров, и др. – Н-ск: Наука, 1985. – 127 с.

11. Архипов Б.А. Исследование и разработка катодов нового поколения для стационарных плазменных двигателей (СПД): Автореф. дисс. ... д.т.н. – Калининград, 1998. – 26 с.

12. Дандарон Г.-Н.Б., Тимошевский А.Н. Проблемы создания высоко-точных катодов для электроплазменных устройств // Генерация потоков электродуговой плазмы. – Н-ск: Ин-т теплофизики СО АН СССР. – 1987. – С. 250 – 270.

13. Трехфазные плазменные нагревательные комплексы и перспективы их применения / Б.Е. Патон, Ю.В. Латаш, О.С. Забарилло и др. // Проблемы специальной электрометаллургии. – 1985. – Вып. 1. – С. 50 – 55. – Вып. 2. – С. 53 – 57.

14. Герман В.О., Кукота Ю.П., Любимов Г.А. Стабилизация диффузной привязки на охлаждаемых электродах с транспирационным вводом активирующих присадок // Генерация потоков электродуговой плазмы. – Н-ск: Институт теплофизики СО АН СССР. – 1987. – С. 271 – 287.

15. Свирчук Ю.С., Голиков А.Н., Журавлев П.Д. Трехфазные электродуговые плазмотроны типа «Звезда». – 6 с. – [Электр. ресурс]. Режим доступа: <http://www.kerc.msk.ru/ipg/papers/papers.shtml>,

Поступила в редакцию 21.03.2005