

УДК 519.63:533.9.07 Д.А. Брега, С.И. Планковский, Е.В. Цегельник, А.М. Алкиб

Исследование влияния эмиссионных свойств катода на режим привязки электрической дуги

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт»*

Показано, что изменение режима привязки электрической дуги к поверхности полого термокатода от диффузного к контрагированному может быть вызвано ухудшением эмиссионных свойств эмиттера под воздействием кислородсодержащих газов. Экспериментальные исследования высокоэмиссионных материалов на основе Ba Sc+W показали их крайнюю чувствительность как к температуре катода, так и к составу атмосферы. Разработана численная модель процесса горения электрической дуги с учетом эмиссионных характеристик материала катода. Предложен новый критерий оценки ресурса работы катодного узла. Сопоставление полученного результата с существующими данными показывает хорошую корреляцию результатов численного исследования с экспериментом.

Ключевые слова: плазмотрон, электрическая дуга, термоэмиссия, эмиттер, диффузная, контрагированная привязка.

Введение

Обзор современного состояния развития электродуговых плазмотронов показывает, что в существующих промышленных конструкциях с «холодными» электродами реализованы практически все способы повышения ресурса электродов. Поэтому достигнутые величины ресурса таких плазмотронов близки к предельно достижимым значениям.

Перспективным направлением для развития плазменного оборудования промышленного назначения является применение полых высокоэмиссионных катодов, которые хорошо зарекомендовали себя в технике электровакуумных приборов, а также в электрореактивных двигательных установках, обеспечивая ресурс работы в десятки тысяч часов.

В настоящее время катодные процессы в дугах атмосферного давления с термоэмиссионными электродами достаточно хорошо изучены, а результаты исследований обобщены в целом ряде работ [1–3]. Эти результаты показывают, что ресурс катодов во многом определяется режимом привязки электрической дуги – диффузной или контрагированной. Контракция дуги к поверхности электрода приводит к повышению удельных тепловых потоков в катоде и резкому увеличению его эрозии. До настоящего времени во многих исследованиях возможность работы полого катода в режиме с диффузионной привязкой при давлениях, близких к атмосферному, подвергается сомнению. Традиционно существование двух устойчивых форм привязки дуги связывают с существованием точек бифуркации в задаче о тепловом балансе катода [2,4]. Экспериментальные исследования причин спонтанного перехода дуги от одного режима к другому проводили в основном для слаботочных дуг, исследования же в дугах с токами порядка 100 А и более остаются немногочисленными [5–7] и дают противоречивые результаты.

В ряде работ смену режима привязки электрической дуги от диффузного к контрагированному связывают с испарением BaO, которым насыщают вольфрамовую губку катода для снижения работы выхода (рис. 1).

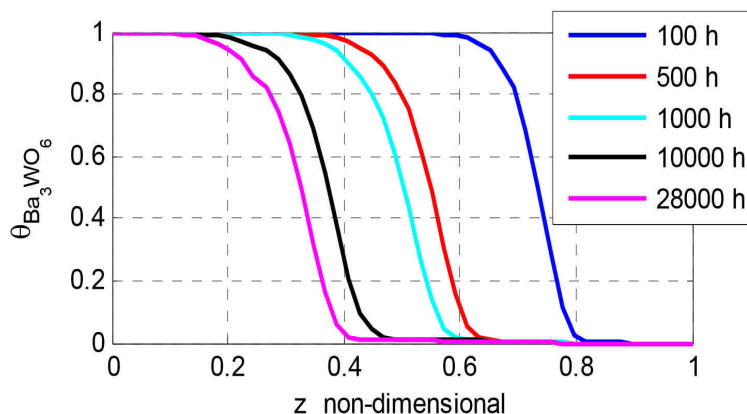


Рис. 1. Ресурс работы полого катода в условиях вакуума

Однако предсказываемый ресурс работы катода на порядок выше, чем в условиях его работы при атмосферном давлении, что свидетельствует о второстепенном влиянии на ресурс процессов уноса оксида бария с поверхности полого катода.

С точки зрения авторов переход от диффузной привязки к контрагированной для термоэмиссионных катодов может быть объяснен повышением работы выхода электронов с поверхности катода в результате его отравления кислородсодержащими газами. После ухудшения эмиссионных свойств поддержание горения дуги возможно только при увеличении температуры эмитирующей поверхности за счет сжатия области привязки.

Существенная зависимость эмиссионных свойств от состава атмосферы вблизи эмитирующей поверхности является известным фактом. Однако до настоящего времени ее игнорируют в исследованиях, посвященных моделированию катодных процессов. Большинство авторов при описании работы термоэмиссионных катодов приводят табличные данные о величине работы выхода для различных материалов, используют их при моделировании, игнорируя тот факт, что эти данные получены при проведении испытаний в условиях глубокого вакуума. Условия вакуумных испытаний не соответствуют условиям работы эмиттера полого катода при атмосферном давлении. В частности, известно, что в зоне привязки дуги к поверхности катода реализуется режим рециклинга эмиссионного материала [8]. В связи с тем, что потенциал ионизации эмиссионных добавок гораздо ниже потенциала ионизации аргона, испарившиеся с поверхности эмиттера атомы с большей вероятностью ионизируются, а образовавшиеся ионы вновь притягиваются на поверхность катода.

В то же время простейшие оценки в работе [9] показывают, что даже при использовании инертных газов высокой степени очистки [12] при давлениях, близких к атмосферному, парциальное давление содержащихся в нем активных газов превосходит критические значения для всех известных термоэмиссионных материалов.

Экспериментальное определение режимов работы катода при разных значениях парциального давления кислородсодержащих газов

В ходе предварительных экспериментов была показана возможность создания условий, близких к условиям работы полого катода в герметическом объеме без протока газа. Характеристиками сравнения работы эмиттеров с протоком и без протока газа выбраны спектры состояния плазмы и вольт-

амперные зависимости разрядов. Для этого изготовлены макеты полых катодов со сменными диафрагмами и корпусами из металла и стекла, а также макет газового диода в стеклянной колбе (рис.2).

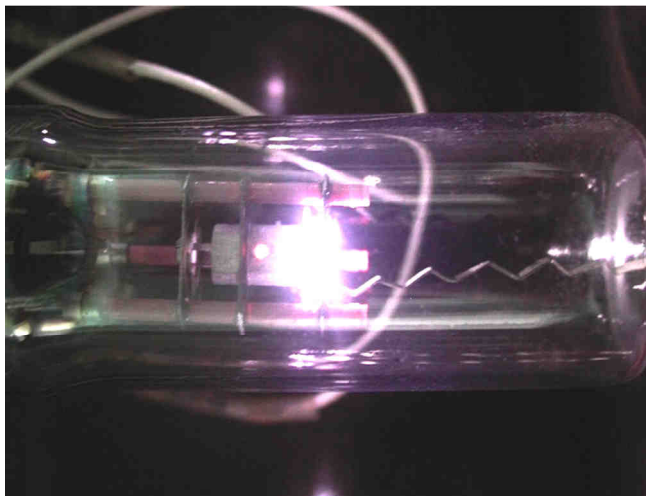
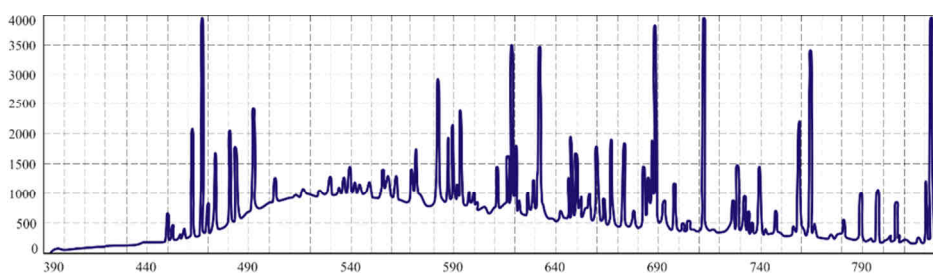


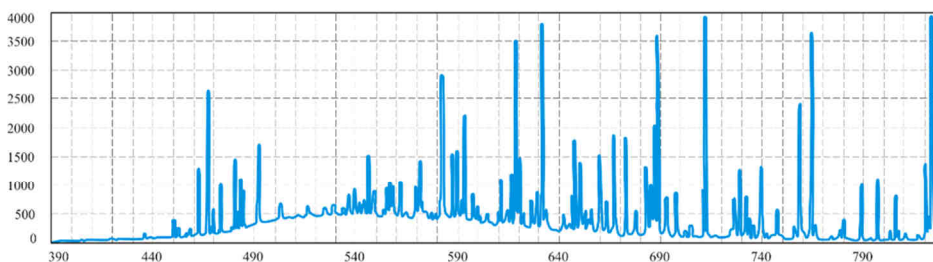
Рис. 2. Макет полого катода в герметичной колбе, применявшегося для ресурсных испытаний

Устройство эмиттерных блоков таких макетов было идентичным и соответствовало реальному полному катоду. Эти макеты использовали для проведения спектрального анализа столба плазмы, примыкающей к эмиттеру. Для сопоставления состояний разрядной плазмы в проточном полном катоде и непроточном диоде проводили сравнение полных спектров в диапазоне длин волн 390...830 нм (рис. 3) с помощью спектрометра HR-4000.

Для ресурсных испытаний эмиттеров был изготовлен ряд макетов полых катодов в герметичных колбах из кварцевого стекла. Испытания проводили для скандатных эмиттеров в диодном режиме. В качестве рабочего газа в колбах использовали ксенон с давлением от 20 до 200 Тор.



а



б

Рис. 3. Полные спектры плазмы в полном катоде и макете:
а – полный катод; б – непроточный диод

В колбах, заполненных ксеноном при давлении от 10 до 100 Тор, эмиттер работал в режиме с диффузной привязкой дуги (см. рис. 4) с приблизительно постоянным напряжением. При давлении выше 100 Тор катод переходил в режим работы с пятном с неустойчивым, скачкообразным изменением напряжения в разряде. Этому режиму сопутствует локальный перегрев поверхности эмиттера в точке привязки с явными признаками эрозии. При заполнении колб использовали ксенон марки 5.8 по ТУ 2114-003-39791733-2002 с содержанием кислородсодержащих примесей на уровне не более 0,3 ppm.

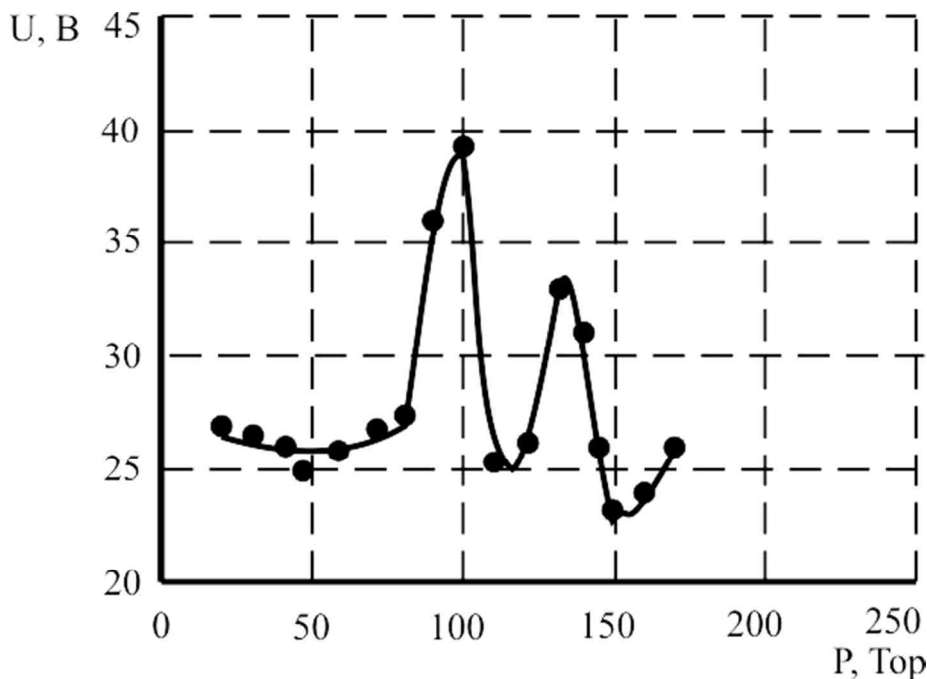


Рис. 4. Зависимость напряжения дуги от давления ксенона в макете катодного узла с полым катодом [9]

При давлении в колбе, равном 100 Тор, парциальное давление активных газов составит: $P_{пар} = 100 \cdot 10^5 \cdot 0.3 \cdot 10^{-6} / 760 \approx 4 \cdot 10^{-3}$ Па, что практически равно критическому парциальному давлению для примененного при изготовлении эмиттера состава 30% $Ba_3Sc_4O_9$ + 70% W ($5 \cdot 10^{-3}$ Па). Таким образом, в проведенных экспериментах переход от режима с диффузной привязкой к режиму с контрагированной дугой связан с превышением критического уровня парциального давления активных газов и связанного с этим отравлением эмиттера.

Численное моделирование

Для подтверждения предположения о возможных причинах изменения режима привязки в настоящей работе проведен следующий численный эксперимент. Моделировали горение дуги между цилиндрическим полым катодом и медным анодом. Материалом катода был выбран состав $Ba_3Sc_4O_9$ + W, полученный методом высокотемпературной пропитки вольфрамовой губки скандатом бария. Использовали экспериментально полученные зависимости эмиссионных свойств данного материала от парциального давления воздуха (рис. 5) и температуры (рис. 6) [10,11]. В качестве защитного газа использовали аргон.

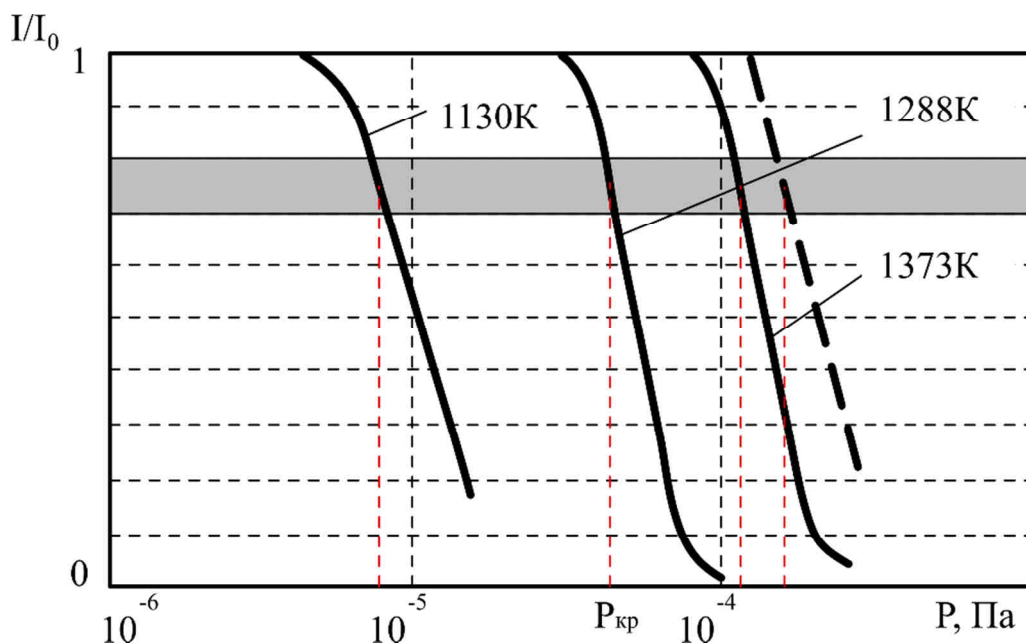


Рис. 5. Зависимость тока эмиссии от давления и температуры

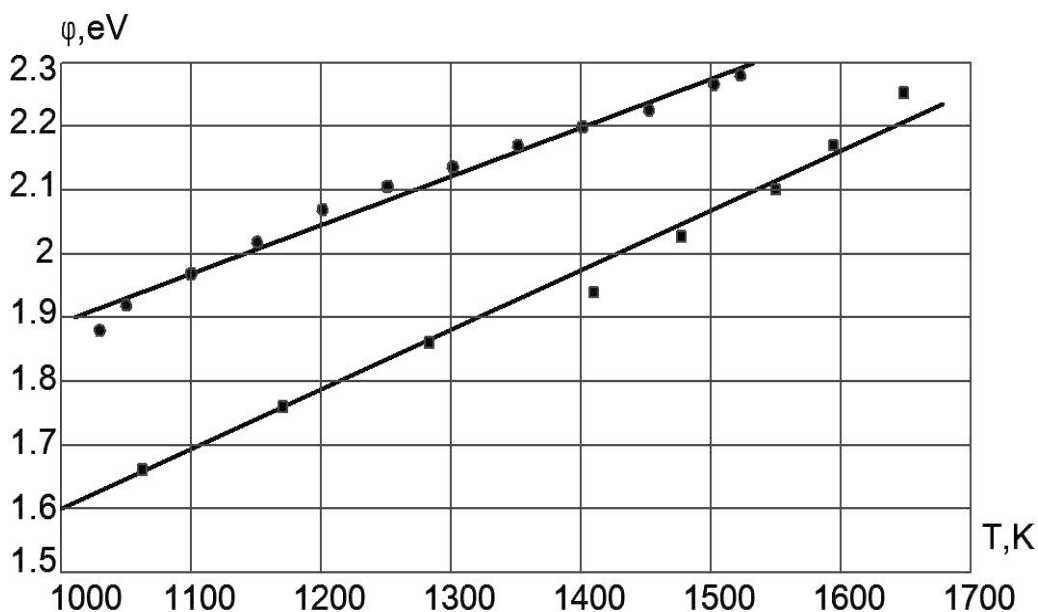


Рис. 6. Зависимость работы выхода электронов от температуры эмиттера $Ba_3Sc_4O_9 + W$ для двух партий образцов

В расчетах учитывали зависимость транспортных коэффициентов и коэффициента диффузии компонент от температуры. Для описания эмиссии использовали закон Ричардсона – Дэшмана. При этом учитывали зависимость работы выхода от парциального давления воздуха у поверхности эмиттера и температуры. Приэлектродные процессы описаны с помощью модели Schmitza [3]. При решении задачи излучение плазмы моделировали в виде отрицательного объемного источника. Для определения зависимости полного излучения от температуры была использована методика расчета, представленная в работе [8].



Рис. 7. Структура прикатодного слоя и характерные размеры области

Решение задачи происходило в два этапа: на первом решали стационарную задачу для дуги, горящей в атмосфере чистого аргона. Далее с использованием этого решения в качестве начального рассматривали нестационарную задачу с постепенным увеличением содержания воздуха в плазмообразующем газе. Дозированный напуск атмосферного воздуха происходил с помощью задания точечного источника с расходом 0.01г/с.

В чистом аргоне дуга устойчиво горела в режиме с диффузной привязкой (рис. 8). Такой же режим сохранялся на начальном этапе решения нестационарной задачи. Однако при дальнейшем увеличении содержания воздуха в плазмообразующем газе происходил переход к контрагированной форме привязки дуги (рис. 9). Дуга случайным образом привязывалась сначала к внутренней поверхности эмиттера, а потом фиксировалась на торце полого катода. Этот результат повторялся при варьировании напряжения.

Результаты моделирования совпадают с наблюдаемыми в экспериментах режимами работы полых катодов с дугами атмосферного давления и могут свидетельствовать о том, что основной причиной перехода к контрагированной дуге в этом случае является отравление материала эмиттера.

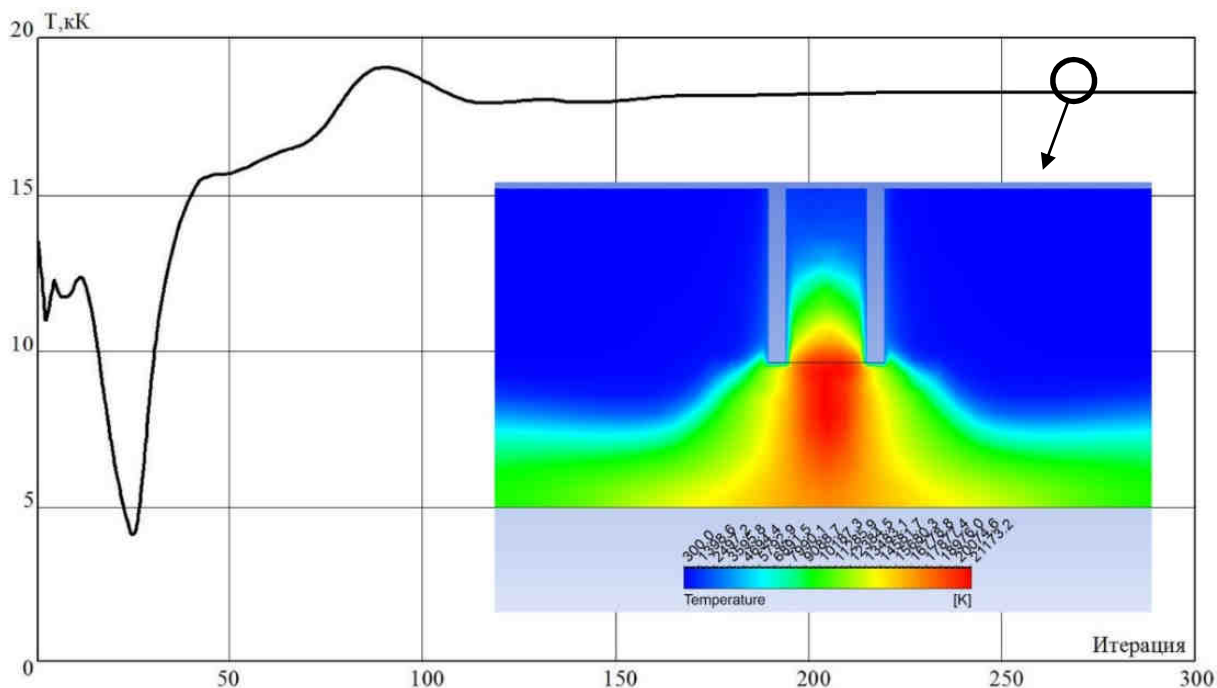


Рис. 8. Электрическая дуга в диффузном режиме привязки при стационарной постановке задачи

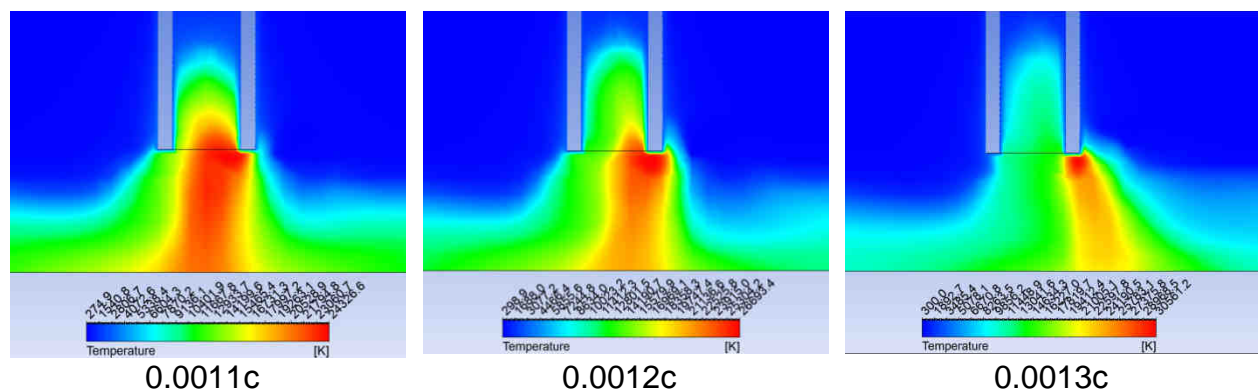


Рис. 9. Изменение режима привязки электрической дуги в результате отравления катода атмосферным воздухом

Выводы

С практической точки зрения это позволяет считать возможным создание работоспособных конструкций плазменных генераторов с полыми термоэмиссионными катодами для работы при высоком давлении. При достижимой степени очистки аргона (порядка 10^{-3} Па по парциальному давлению воздуха [13]) это требует применения катодных материалов, обеспечивающих возможность достаточного уровня эмиссии. Такими материалами могут быть, например, композиции вида $W + Ba_xMe_yMe_zO_v$ ($Me = Sc, Sr, Hf, Zr$), некоторые из них сохраняют эмиссионные свойства вплоть до значений 10^{-2} Па по парциальному давлению воздуха [14].

Список литературы

1. Приэлектродные процессы в дуговых разрядах [Текст] / М.Ф. Жуков, Н.П. Козлов, А.В. Пустогаров и др. – Новосибирск: Наука, 1982. – 158 с.
2. Математическое моделирование катодных процессов. Низкотемпературная плазма [Текст] / А.М. Зимин, И.П. Назаренко, И.Г. Паневин, В.И. Хвесюк – Новосибирск: Наука, 1992. – Вып. 10. – 197 с.
3. Schmitz H., Riemann K. //J. Phys. D: Appl. Phys. – 2002. – Vol. 35. – P.1727 – 1735.
4. Теория и расчет приэлектродных процессов. Низкотемпературная плазма. [Текст] / И.Г. Паневин, В.И. Хвесюк, И.П. Назаренко и др. – Новосибирск: Наука, 1992. – Вып. 10. – 197 с.
5. Mesyats, G.A. Cathode phenomena in a vacuum discharge: the breakdown, the spark and the arc. Moscow: Nauka, 2000. 400 p.
6. Benilov M.S. and Marotta A. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1995. – Vol. 28. – P.1869 – 1882
7. Митрофанов, Н.К. Две формы привязки атмосферной дуги постоянного тока в аргоне к термоэмиссионному катоду [Текст]/ Н.К. Митрофанов, С.М. Школьник //ЖТФ. – 2007. – Т. 77. Вып. 6. – С. 34 – 44
8. Нгуен Куок Ши. Исследование индукционных и дуговых плазмотронов: дис... д-ра техн. наук: / Нгуен Куок Ши. – Санкт-Петербург, 2002. – 439 с.

9. Планковский, С. И. Научные основы создания высокоресурсных термоэмиссионных катодных узлов оборудования для плазменной обработки материалов: дис... д-ра техн. наук: 05.03.07 / Планковский Сергей Игоревич. – Харьков, 2009. – 333 с
10. Кошелев М.М. Ресурсні випробування емітерів слабкострумівих катодів // Авіаційно - космічна техніка і технологія. – 2007. – №7(43). – С. 78 – 90.
11. Предварительные испытания W-Ba-Sc эмиттеров катодов ЭРД [Текст] / А.В. Лоян, Н.Н. Кошелев, Е.П. Солонинко, Е.Г. Агеева // Двигатели и энергоустановки аэрокосмических летательных аппаратов. – 2010. – №8(75). – С. 68–71.
12. ГОСТ 10157-79. Аргон газообразный и жидкий. Технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1994. – 21 с.
13. Ажажа, В.М. Устройства финишной очистки технологических газов на основе не распыляемых геттеров из сплавов Zr-Al, Zr-Fe, Hf-Fe [Текст] / В.М. Ажажа, Р.В. Ажажа, П.Н. Вьюгов и др. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники – 2006. – №1(15). – С. 26 – 29.
14. Plankovsky, S. Review of LaB₆, Re-W dispenser and BaHfO₃-W cathode development/S. Plankovsky, A.Taran, V. Voronovich, V. Paderno, V. Filipov// IEEE Transactions on electron devices. – 2009. – Vol. 56, No. 5. – P. 760 – 765.

Поступила в редакцию 20.03.2017

Дослідження впливу емісійних властивостей катода на режим прив'язки електричної дуги

Показано, що зміна режиму прив'язки електричної дуги до поверхні порожнистого термокатада від дифузної до контрагованої може бути викликано погіршенням емісійних властивостей емітера під впливом кисневмісних газів. Експериментальні дослідження високоемісійних матеріалів на основі Ba Sc + W показали їх крайню чутливість як до температури катода, так і до складу атмосфери. Розроблено математичну модель процесу горіння електричної дуги з урахуванням емісійних характеристик матеріалу катода. Запропоновано новий критерій оцінювання ресурсу роботи катодного вузла. Зіставлення отриманого результату з існуючими даними показує хорошу кореляцію результатів чисельного дослідження з експериментом.

Ключові слова: плазмотрон, електрична дуга, термоемісія, емітер, дифузна, контрагована прив'язка.

Investigation of the Cathode Emission Properties Influence on the Arc Attachment Mode

It is shown that the change of the electric arc attachment mode to the surface of a hollow thermionic cathode from diffuse to contracted mode can be caused by a deterioration of the emission properties of the emitter under the influence of oxygen-containing gases. Experimental studies of high-emission materials based on Ba Sc + W showed their extreme sensitivity, both to the temperature of the cathode and to the composition of the atmosphere. A numerical model of the electric arc burning process is

developed taking into account the emission characteristics of the cathode material. A new criterion for estimating the life time of a cathode node is proposed. Comparison of the obtained results with the existing data shows a good correlation of the numerical study with the experiment.

Key words: plasma torch, electric arc, thermionic emission, emitter, diffuse, contracted binding.

Сведения об авторах:

Планковский Сергей Игоревич - д-р техн. наук, профессор, декан факультета самолетостроения, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский Авиационный Институт», Украина.

Брега Дмитрий Андреевич - канд. техн. наук, доцент кафедры технологии производства летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский Авиационный Институт», Украина.

Цегельник Евгений Владимирович - канд. техн. наук, старший научный сотрудник кафедры теоретической механики, машиноведения и роботомеханических систем, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский Авиационный Институт», Украина.

Алкиб Ахмед М. - аспирант кафедры технологии производства летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский Авиационный Институт», Украина.