

Поведение дуги на катоде в плазме продуктов сгорания
Behaviour of the arc at cathode in combustion products plasma

Петров С.В., Докт. Техн. наук
Институт газа НАН Украины
Украина, 03113, Киев -113
ул. Дегтяревская,39

Васенин Ю.Л., Канд. физмат. наук
Институт электросварки им. Е.О.Патона НАН Украины
Украина, 03650, Киев-5, ГСП
Ул. Боженко,11

Prof. S.V. Petrov
The Gas Institute National Academy of Sciences of Ukraine
39 Degtiarivska St., 252113 Kiev, Ukraine
Dr. Yu.L.Vasenin
The E.O.Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine,
11, Bozhenko st., 03650, Kyiv, Ukraine

Контакт:
Петров Станислав Владимирович
Украина, 03134, Киев,
Пр. Королева, 4/95
Тел/факс: + 38044 585 26 06
Моб. Тел: + 38066 103 78 36
E-mail: plasma@svp.relc.com

Аннотация

Обнаружено, что изменение параметров смеси углеводородного газа с воздухом на обдув катода приводит к изменению характера поведения пятна дуги на поверхности электрода с гафниевой или циркониевой вставкой. Установлено, что дуга в смеси может работать в двух режимах. Первый – с пятном на пленке расплава по типу воздушной дуги. Второй – с резко контрагированным пятном, при этом плотность тока увеличивается в 10 и более раз. Возможна длительная работа, как на первом, так и втором режимах. Переход дуги к режиму горения с резко контрагированным пятном осуществляется скачком после насыщения эмиссионной пленки углеродом и последующего повышения коэффициента избытка окислителя. При этом эмиссионная пленка преобразуется и под пятном привязки дуги образуется выпуклость, которая является истинным катодом. Эрозия материала отсутствует, в прикатодной области дуги устанавливается режим работы с кипящим слоем, когда количество испарившегося материала катода уравнивается возвратом ионов, как материала катода, так и углерода. Переход дуги к режиму горения с резко контрагированным пятном всегда сопровождается формированием самовосстанавливающегося катода. Эмиссионная пленка имеет сложную структуру, которая зависит от режима работы и содержит материал катода (гафний или цирконий), азот, кислород и углерод в нестехиометрических соотношениях. Сформулированы физическая и математическая модели прикатодного слоя плазмы и процессов на поверхности катода. На основе интегральных балансов, без использования в расчетах экспериментальных данных для катодных пятен, определены параметры и характеристики прикатодного слоя в зависимости от температуры поверхности и прикатодного падения потенциала. Рассчитаны граничные условия на поверхности катода со стороны плазмы для потока энергии, плотности тока, давления и возвращающейся части испаренного потока атомов, поступающих из прикатодной плазмы, а также флуктуации среднего поля. В итоге, резкая контракция дугового пятна сопровождается рядом особенностей работы катода и приводит к положительным результатам. Кроме повышения ресурса катода, работающего на газозвушной смеси, обеспечивается стабилизация напряжения на дуге в течение всего периода его работы, поскольку не происходит изменение геометрических размеров.

Abstract

Processes that involve plasma of the products of combustion of air with a hydrocarbon gas take a special position among plasma technologies used for materials treatment. Owing to unique properties of such a plasma (high values of heat capacity and thermal conductivity, ease of redox potential regulation, availability and low relative cost), the processes on its base attract an increasingly high interest of researchers and industry. Widening of application of plasmatrons operating with a mixture of air and a fuel hydrocarbon gas (methane, propane-butane) and increase in technological requirements make it necessary to look for new ways of improving performance of heavy-loaded elements, and cathode in the first turn. Studies conducted in this field led to revealing a new, highly promising effect in the cathode processes. As shown by the studies, variation of parameters of the mixture of hydrocarbon gas with air used to blow the cathode leads to variation in the character of behaviour of the arc spot on the surface of electrode with a hafnium or zirconium insert. The arc in the above mixture may operate in two modes. In the first mode the spot is located on the film of the melt by a type of the air arc. In the second mode the spot is transformed into a highly contracted one, the current density being 10 and more times as high. A long-time operation is possible in both modes. The arc switches to the mode of burning with a highly contracted spot in an abrupt manner, after the emission film becomes saturated with carbon, which is followed by increase in the excess-oxidiser-coefficient. This causes transformation of the emission film and formation of convexity under the arc spot location, this convexity acting as a real cathode. No erosion of material occurs, and the fluidised-bed operation mode is reached, where the amount of an evaporated material is balanced by return of ions of both cathode material and carbon. Switch of the arc to the mode with a highly contracted spot is always accompanied by formation of a self-recovering cathode. The emission film has a complex structure that depends upon the operation conditions, and contains the cathode material (hafnium or zirconium), nitrogen, oxygen and carbon in non-stoichiometric proportions. Physical and mathematical models of the near-cathode layer of plasma and processes occurring on the cathode surface have been formulated. Parameters and characteristics of the near-cathode layer depending upon the surface temperature and near-cathode potential drop have been determined on the basis of integral balances using no experimental data in the calculations. Boundary conditions for the cathode surface on the side of plasma have been calculated for the energy flow, current density, pressure and returning part of the evaporated flow of atoms coming from the near-cathode plasma, as well as fluctuation of the central field. Therefore, the abrupt contraction of the arc spot is accompanied by a number of peculiarities of the cathode operation and leads to positive results. In addition to increase in service life of the cathode operating with the air-gas mixture, this provides stabilisation of voltage of the arc during its entire service period, as no changes in geometric sizes take place.

Введение

Особое место среди плазменных технологий обработки материалов занимают процессы с использованием плазмы продуктов сгорания воздуха с углеводородным газом. Благодаря уникальным свойствам такой плазмы (высоким значениям теплоемкости и теплопроводности, легкости регулирования окислительно-восстановительного потенциала, недефицитности и малой относительной стоимости) процессы на её основе все больше привлекают интерес исследователей и промышленности. Широкое освоение плазмотронов, работающих на смеси воздуха с горючим углеводородным газом (метаном, пропан-бутаном) и повышение технологических требований обуславливают необходимость поиска новых путей улучшения работоспособности теплонагруженных элементов, в первую очередь катода. Исследования в этом направлении увенчались выявлением нового эффекта в катодных процессах, понимание и учет которого может дать значительную пользу при практической реализации плазменных технологий.

Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования выполнены на плазменной установке ПЛАЗЕР-80 [1], предназначенной для плазменного поверхностного упрочнения [2] и напыления защитных покрытий [3]. В плазмотроне косвенного действия с одиночной металлической межэлектродной вставкой (МЭВ) (Рис.1а) данной установки используется торцевой термохимический катод с гафниевой или циркониевой активной вставкой. Он обдувается вихревым потоком смеси воздуха с метаном. Износ такого катода определяется глубиной выработки активной вставки и при глубине кратера 1,5 диаметра вставки катод подлежит замене. В рабочем диапазоне режимов работы плазмотрона катодное опорное пятно дуги горит на расплаве оксинитридной (при обдуве воздухом) или оксикарбонитридной (при обдуве смесью воздуха с метаном) пленки. Изучение состояния рабочей поверхности катода и поведения прикатодной части столба дуги проводилось в плазмотроне через смотровое окно из кварцевого стекла в МЭВ под углом 45° к оси (Рис.1а)

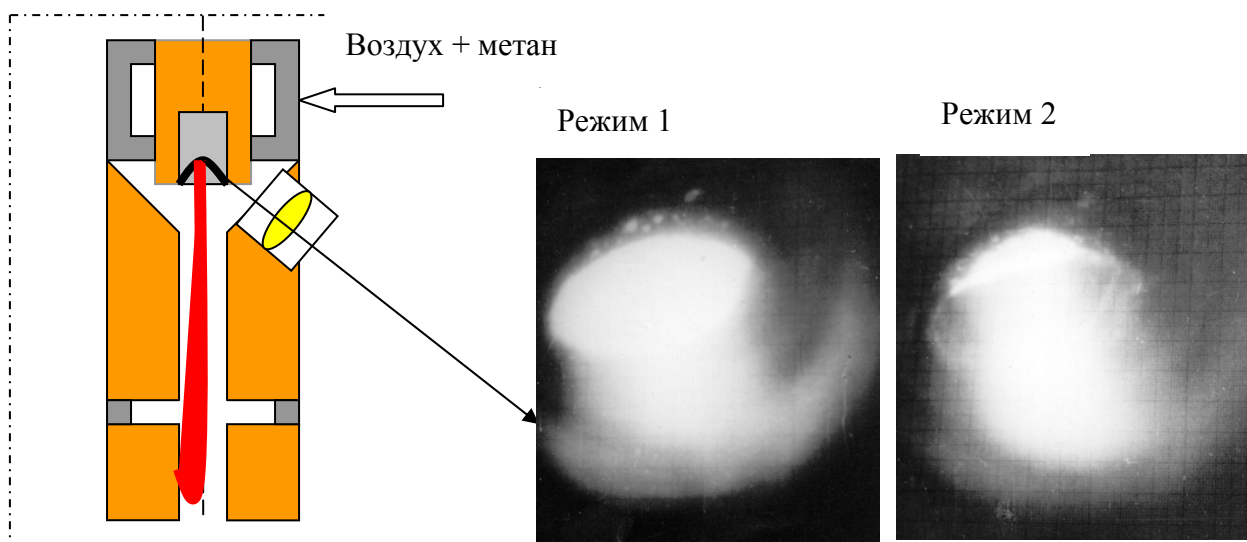


Рис. 1. Вид катодного пятна и столба дуги, $I = 200 \text{ А}$.

Варьирование состава смеси путем изменения соотношения газ/воздух (коэффициента избытка окислителя α) в следующей последовательности $\alpha = \infty \rightarrow 0,6 \rightarrow 1$ приводит к изменению характера привязки катодного опорного пятна к поверхности электрода. Установлено, что дуга на смеси может длительно устойчиво существовать в двух режимах. Первый – с пятном на пленке расплава по типу воздушной дуги ($\alpha = \infty$, режим 1), (рис.1б) второй – с резко контрастирующим пятном, ($\alpha \approx 1$, режим 2), (рис.1в). Плотность тока при переходе от режима 1 к режиму 2, рассчитанная по тепловому следу, увеличивается на порядок. Исследования выполнены в диапазоне изменения

тока дуги 100 – 300 А, расхода смеси 4 – 10 нм³/час. На первом режиме катодное опорное пятно может устойчиво существовать в течение всего времени катода, до полного выгорания активной вставки. В этом случае при добавлении горючего углеводородного газа к воздуху диаметр светящегося пятна под привязкой разряда увеличивается на 5 – 10 % примерно на такую же величину возрастает тепловой поток. Работа на обогащенной смеси (когда содержание метана становится больше стехиометрически необходимого для полного сжигания топлива, $\alpha < 1$) характеризуется повышенной подвижностью катодного пятна. На поверхности после отключения дуги сохраняются замороженные волны (рис.2 а) На втором режиме при резком контрагировании дуги размер светящегося пятна уменьшается в 3 – 4 раза, а под её привязкой образуется выпуклость (рис.2 б). Общий вид кратера приведен на рис. 2 в.

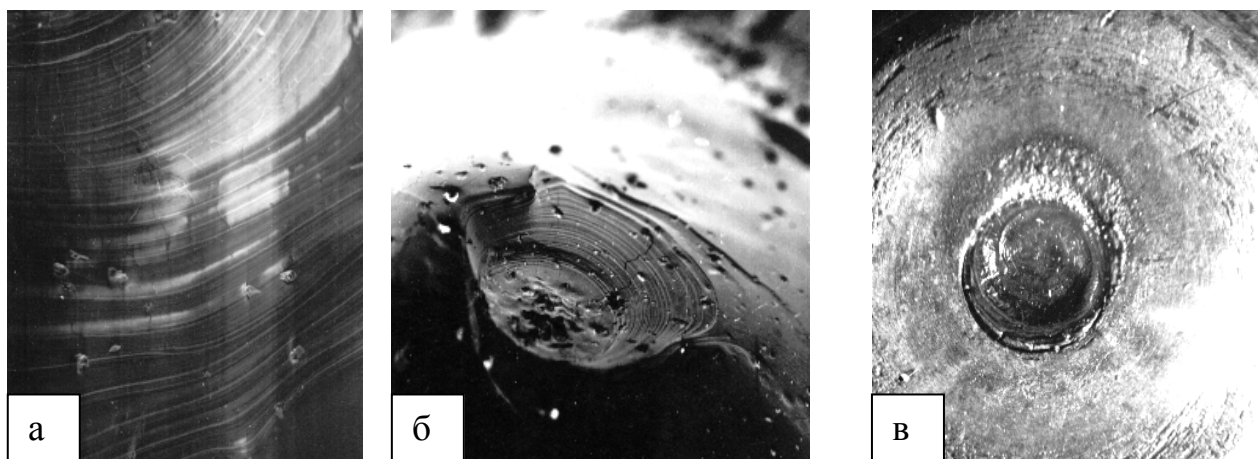


Рис.2 Вид поверхности катода после отключения дуги
а – режим 1, б – режим 2, в – общий вид кратера

При добавлении горючего углеводородного газа к воздуху эмиссионная плёнка катода насыщается углеродом, содержание кислорода в ней снижается, микротвердость возрастает. Насыщение эмиссионной плёнки (под пятном дуги) циркониевого катода кислородом, углеродом при работе на токе дуги 300 А в течение 1 часа характеризуют следующие данные (таблица 1):

Таблица 1

Содержание CH ₄ в смеси с воздухом, %	0	10	15
[O], % (ат.)	34	29,5	14
[C], % (ат.)	-	7	30
H _ц , МПа	10 ⁴	1,28·10 ⁴	1,56·10 ⁴
Толщина эмиссионной пленки, δ,мм	0,9	1,3	1,1

Переход дуги от режима горения 1 к режиму 2 осуществляется скачком после насыщения эмиссионной пленки углеродом через переходной режим 1-2, Микрошлифы эмиссионных пленок, соответствующих режимам 1, 2 и переходному 1-2 приведены на рис.3. Рис.3 а,г – режим 1, рис.3 б.д. - переходной режим 1-2, Рис 3 в,е – режим 2.

Теоретические исследования

Физическая модель катодной области электрической дуги включает описание процессов массо -, токо - энергопереноса. С поверхности катода в приэлектродный слой плазмы поступают испарившиеся атомы материала катода и нейтральные атомы плазмообразующего газа, пришедшие на катод из столба дуги в виде ионов. Ускоренные прикатодным падением эмиттированные электроны передают свою энергию плазменным электронам, которые расходуют её на ионизацию атомов и формирование в предслое пространственного заряда потока ионов на катод. Таким образом, на катод поступают ионы, пришедшие как из столба дуги, так и ионы,

образовавшиеся в непосредственной близости к слою пространственного заряда. Ионный состав приэлектродной плазмы определяется концентрациями нейтральных атомов, их потенциалами ионизации и температурой электронов и рассчитывался по уравнению Саха. Поток заряженных частиц формирует слой пространственного заряда у поверхности, электрическое поле которого влияет на процесс эмиссии электронов. Соответствующая система уравнений сформулирована в работе [4]

Микрошлиф на режиме 1

Микрошлиф на режиме 1 - 2

Микрошлиф на режиме 2

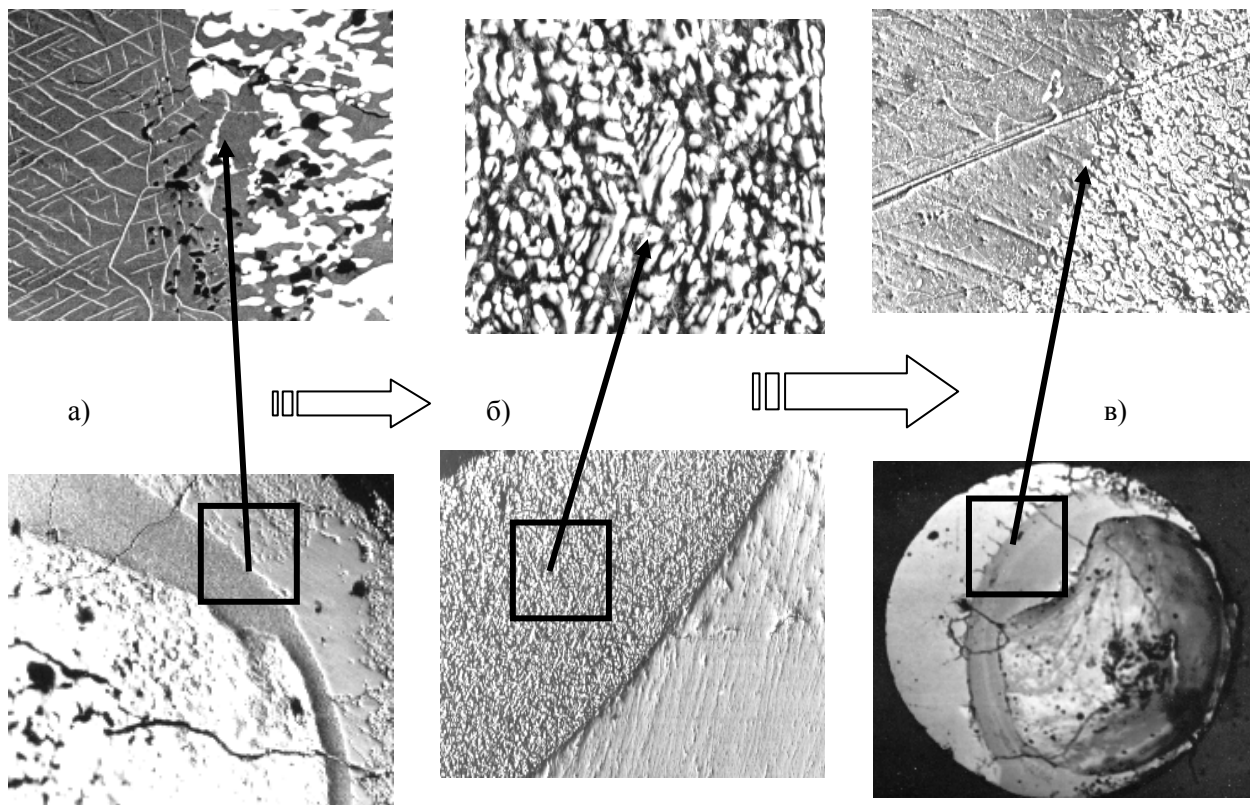


Рис.3. Микрошлифы эмиссионной пленки на различных режимах работы катода

В отличие от вакуумных дуг, когда образование плазмы непосредственно связано с эрозией электрода, в дугах высокого давления с термоэмиссионным катодом, при наличии внешнего плазмообразующего газа, влияние испарения катода на плазму не значительно. Особенности катодных процессов [5,6], возникают в том случае, когда электрическая дуга горит в газе, содержащем углерод. При некоторых условиях наблюдается формирование “истинного” катода, что сопровождается увеличением срока службы термохимической вставки. Процессы в пределах “истинного” катода приобретают черты, характерные для электрической дуги в парах материала катода. Расчеты [4] показали, что вакуумной дуге возврат испарившегося материала может достигать 97%. В условиях “истинного” катода наблюдается аналогичное явление. Как видно из рис.4а, для значений прикатодного падения потенциала $U_c \sim 13$ В и температур поверхности $T_c \geq 3500$ К имеет место скачкообразное увеличение возврата испарившихся с поверхности катода атомов углерода. Недостающая до 1 часть уходящих с поверхности атомов углерода покрывается их поступлением из плазмы столба дуги. О том, что необходимые для испарения углерода высокие температуры имеют место, свидетельствуют волны, наблюдаемые на расплавленной поверхности тугоплавкой термоэмиссионной катодной вставки в режиме 1, предшествующем режиму 2 – “истинного” катода.

В окрестности этих же значений наблюдается скачек плотности тока $J_c = J_i + J_e$ (рис.4б). Это связано с тем, что в условиях увеличившегося возврата (рециклинга) атомов углерода плотность тока ионов на катод возрастает, растет напряженность электрического поля у поверхности, что сопровождается ростом плотности тока электронной эмиссии. Следует отметить, что в этом режиме плазма состоит, в основном из атомов/ионов углерода, которые имеют существенно меньший потенциал ионизации по сравнению с атомами газа.

Расчеты показывают, что происходит также увеличение потока энергии Q_s на поверхность (рис.4в), изолинии которого сгущаются в окрестности указанных (U_c, T_c) .

Кроме потерь, вызванных теплопроводностью, полный поток энергии Q_s через металлическую поверхность обеспечивается главным образом потерей энергии Q_v испарения атомов, обмена энергии Q_{em} электронной эмиссии (Ноттингемский эффект) и приходом энергии Q_{ip} аккомодации ионов и атомов, возвращающихся к поверхности, а также Q_{ep} благодаря возврату плазменных электронов:

$$Q_s = -Q_v - Q_{em} + Q_{ip} + Q_{ep},$$

Эти составляющие описываются следующими уравнениями:

$$Q_v = \sum_m I_{v0}^m \cdot (1 - \beta_m) \cdot (E_v^m + 2kT_c),$$

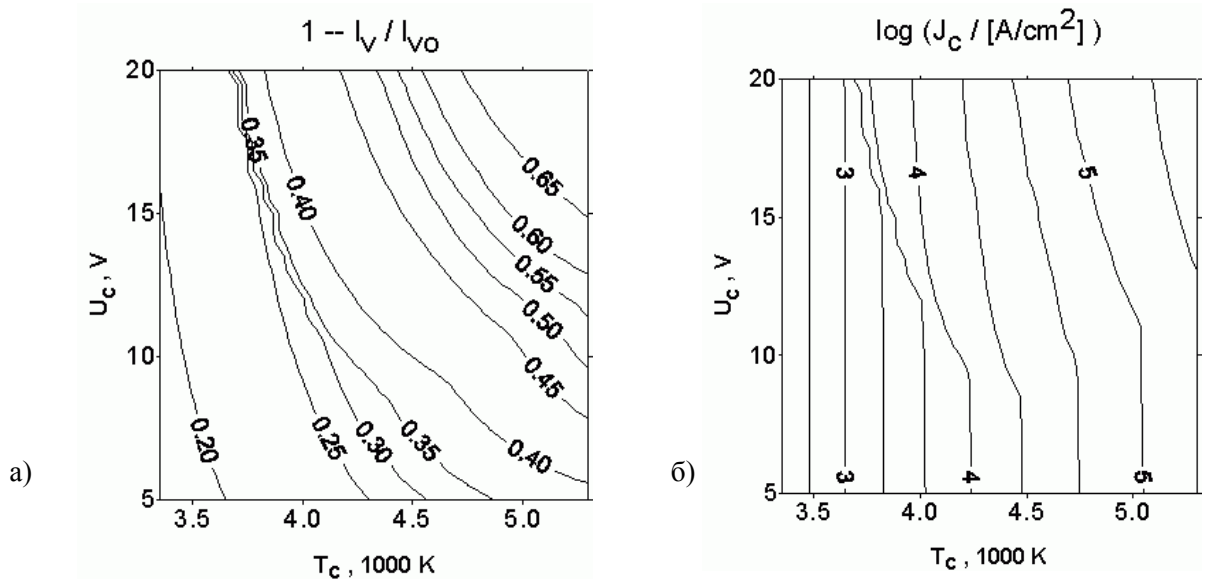
$$Q_{ep} = J_{ep} \cdot (U_c - \Delta\phi_s + \phi + 2kT_e/e),$$

$$Q_{ip} = \sum_m \sum_z \frac{J_{iz}^m}{z} \left((U_c - \Delta\phi_s) \cdot z + \sum_{p=1}^z (U_{ip}^m - \phi) + (E_v^m + 2kT_c)/e + \frac{1}{2e} \tilde{Z}kT_e \right)$$

$$Q_{em} = J_{em}^{FT} \cdot (-\phi_{FT} + \phi) + \sum_m \sum_z \frac{J_{iz}^m}{z} \gamma_{IFT, m}^z \left(-\phi_{IFT, m}^z + \phi \right)$$

Здесь: I_{v0}^m — поток удаляющихся от катода (испарившихся) атомов m-го сорта; β_m -- коэффициент возврата; J_{em}^{FT} — плотность тока термополевой эмиссии электронов, $\phi, \phi_{IFT, m}^z$ ФФТ — работа выхода и потенциалы Notingham для термополевой эмиссии электронов с учетом и без учета полей индивидуальных ионов, соответственно; J_{iz}^m — плотность тока z-кратных ионов m-го сорта; $\Delta\phi_s$ — поправка Schottky; E_v^m — энергия, уносимая атомом m-го сорта с поверхности при испарении; T_e — температура электронов в приэлектродной плазме; J_{ep} — плотность тока обратных электронов из плазмы; e -- заряд электрона.

Переход в режим "истинного" катода сопровождается также скачком избыточного давления на поверхность со стороны прикатодной плазмы. Как следует из представленных на рис.3г зависимостей, эта разность давления может вырасти почти на порядок величины в режиме 2 и может являться причиной формирования наблюдаемой геометрии образований на поверхности катода - выпуклостей и впадин - взаимное расположение которых будет определяться распределением температуры в теле электрода.



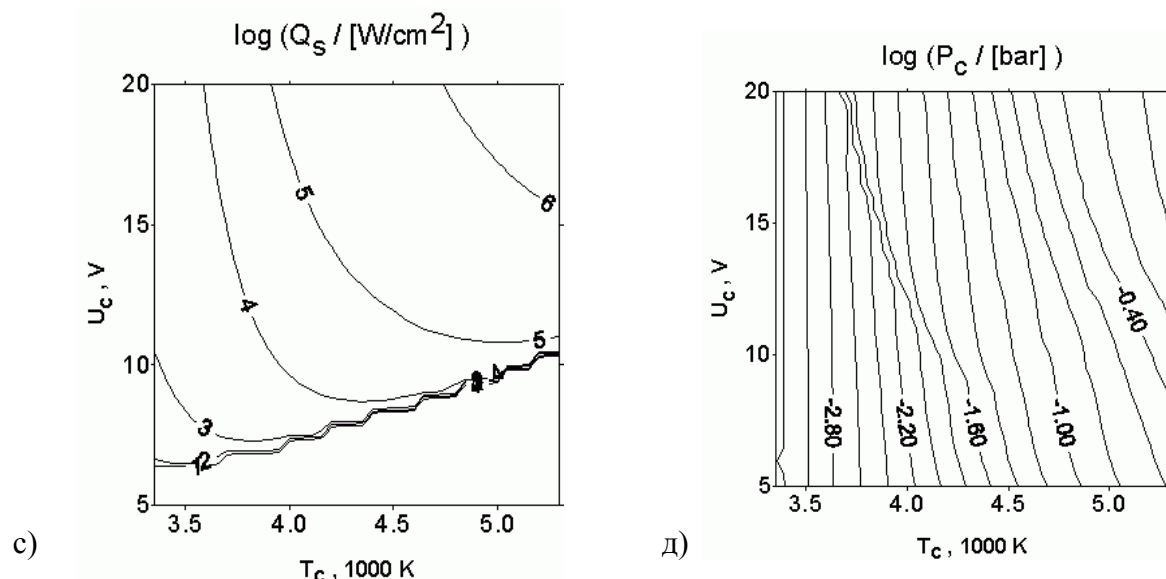


Рис. 4. Граничные условия на поверхности катода

а – отношение возвращенного потока частиц (в виде ионов и нейтральных атомов) к испаренному потоку атомов, б – плотность тока на катоде, в – поток энергии на поверхность катода со стороны плазмы, г – давление в катодной области.

Обсуждения результатов исследований

Резкая контракция дугового пятна в плазме продуктов сгорания углеводородного газа с воздухом сопровождается рядом особенностей работы катода и приводит к положительным результатам. Под пятном дуги всегда формируется утолщение эмиссионной пленки (рис.2б, 3в,е), за счет возврата испарившегося материала и осаждения углерода, т.е. образуется восстанавливающийся из газовой фазы (за счет углерода) катод. При отключении и повторном возбуждении дуги она всегда возвращается на прежнее место. Примечательно, что дуга при одинаковом составе плазмообразующей смеси может устойчиво существовать в двух принципиально различных режимах. Это зависит только от предистории в изменении состава газовой атмосферы. Работа термохимического катода на первом режиме достаточно хорошо исследована [7]. В этом случае материал активной вставки при работе безвозвратно теряется с повышенной эрозией при запусках. Переход к режиму с резкой контракцией катодного опорного пятна происходит в сформированном кратере (рис.2 б,е). При этом исчезают пространственная неустойчивость катодного опорного пятна, присущая для работы на смеси, флуктуации параметров разряда, дрейф падения напряжения на дуге. Происходит это вследствие более жесткой пространственной фиксации прикатодной части разряда и долговременной стабильности. В плазмотронах осевой схемы с торцевым термокатодом любые возмущения в прикатодной части разряда сносятся вниз по потоку и вызывают пульсации параметров струи. Например, при плазменном напылении в сверхзвуковой струе получение высококачественного покрытия с воспроизводимыми характеристиками невозможно без стабилизации всех параметров струи во время работы. Любые пульсации отразятся на свойствах покрытия. Исследованный метод резкой контракции прикатодного участка дуги с сопутствующим радикальным повышением стабильности разряда применен в новой установке сверхзвукового плазменного напыления ТОПАС-40 [8]. Благодаря этому увеличивается в несколько раз ресурс работы катода, стабилизируется напряжение на дуге, гарантировано воспроизводятся все характеристики покрытия на микро и макро уровнях.

Заключение,

1. Обнаружено и исследовано явление резкой контракции прикатодного участка дуги в плазме продуктов сгорания переменного состава.
2. Горение электрической дуги в режиме резкой контракции сопровождается самовосстановлением эмиссионной пленки углеродом из газовой фазы и пространственно временной стабилизацией разряда.
3. Метод резкой контракции прикатодного участка дуги с сопутствующим радикальным повышением стабильности разряда применен в новой установке сверхзвукового плазменного напыления ПЛАЗЕР-40

Литература

1. Петров С.В. Плазма продуктов сгорания в инженерии поверхности. Киев, ТОПАС, 2000, 218 с.
2. Petrov S.V. Technology and Equipment for Plasma Surface Hardening of Heavy-Duty Parts, *Materials and Manufacturing Processes*, 17(3), 363-378 (2002)
3. Petrov S.V. New Plasma Equipment for Supersonic Spraying, Proceedings of the 14th Int. Conf. on Surface Modification Technologies held in Paris, France, September 11-13, 2000, 454-458.
4. Juttner, B. Vasenin Yu., Cathodic Processes of the Metal Vapor Arc, Paton Publishing House, Kiev, 2003, 67 p.
5. Фридлянд М.Г. Исследование работы стержневого катода при горении дуги в углеводородах. Теплофизика высоких температур, 1973, №2, с.27-35.
6. Фридлянд М.Г. Особенности работы катода постоянно восстанавливающегося из атмосферы сжатой дуги. Автоматическая сварка, 1977, №11, с. 16-18.
7. Термохимические катоды/ М. Ф. Жуков, А.В. Пустогаров, Г.-Н.Б. Дандарон, А.И.Тимошевский. Новосибирск: Изд ИТФ, 1985, 193 с.
8. Петров С.В. Установка плазменного напыления. Сварщик, №3(25), 2002, с. 11-12.