

Ресурс электродов технологической установки «ПУСК»

*Национальный аэрокосмический ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»
Харьковский университет радиоэлектроники (ХНУРЭ)*

Разработана модель прогнозирования ресурса электродов установки «ПУСК», которая учитывает действие электродных пятен, испарение, распыление, напряженное состояние электродов и эрозию в режиме выхода на стационарный режим и в стационарном режиме.

Ключевые слова: электродные пятна, стационарный режим, излучение плазмы.

Введение

Высокопроизводительное нанесение покрытий на установке «ПУСК» говорит о необходимости исследования возможности длительной работы этой установки и поэтому вопрос прогнозирования ее электродов актуален.

В то же время установка «ПУСК» является базовой для создания установки «Плазменный котел» разработки А. Дороднова [2], что говорит о необходимости исследования ресурса электродов этой установки.

Работа выполнялась в рамках программы Министерства образования и науки Украины "Новые ресурсосберегающие и технологии в энергетике, промышленности и агропромышленном комплексе" (подсекция 13), "Аэрокосмическая техника и транспорт" и по темам "Создание физико-технических основ повышения качества материала аэрокосмических конструкций" и "Разработка технологических основ интегрированных технологий плазменно-ионной обработки деталей аэрокосмической техники", а также в рамках хоздоговорных работ и договоров о сотрудничестве.

1. Состояние вопроса

Как показали исследования А. Поротникова с сотрудниками [1], при запуске торцевого холловского ускорителя реализуются режимы с электродными пятнами. При создании методики расчета ресурса и исследовании динамики изменения геометрии и температурных напряжений используем общий подход к определению ресурса. Для этого типа ускорителей из-за низкой энергии заряженных частиц, бомбардирующих электродов ТХУ, величины температурных напряжений в зоне действия индивидуальных частиц малы, что свидетельствует о невозможности реализации термоупругого и термоусталостного разрушения в зоне их действия. Поэтому изменение геометрии в результате этих видов разрушения рассматриваться не будет.

2. Состояние вопроса

Проводятся теоретическое исследование и его сравнение с экспериментами по интегральным результатам по применению геометрии электродов установки «Пуск» в режиме запуска и стационарном режиме, а также расчет его ресурса.

3. Постановка задачи и результаты исследования

3.1. Изменение геометрии в результате действия электродных пятен в период выхода на стационарный режим

По величине полного тока, реализующегося в разряде I , и тока, переносимого пятном $I_n(I_n = j_{a,k} \cdot S_{a,k})$, определяем количество одновременно существующих электродных пятен N , реализующихся на поверхности анода и катода:

$$N_k = \frac{I}{I_{nk}} \quad \text{и} \quad N_a = \frac{I}{I_a}.$$

Так, с учетом параметров электродных пятен при $I = 100$ А и $U_p = 35$ В на катоде из молибдена будет существовать непрерывно восемь пятен, а на катоде из вольфрама – пять, тогда как на вольфрамовом аноде существует только одно пятно, причем все электродные пятна перемещаются. По известным (или предполагаемым) параметрам электродных пятен на катоде и аноде находим эффективное вероятное время однократного действия электродного пятна на всей поверхности электрода:

$$\tau_{эфф} = \frac{S_{k,a} \tau_{жс}}{N_{k,a} S_{k,a}},$$

где $S_{k,a}$ – рабочая площадь поверхности анода или катода; $\tau_{жс}$ - время жизни катодного или анодного пятна; $S'_{n,k,a} = S_{n,k,a} + 2R_{n,k,a} V_{n,k,a} \tau_{жс}$ (R_n , V_a – радиус и скорость перемещения пятна); $S'_{n,k,a}$ - площадь следа от действия катодного или анодного пятна.

С учетом изменения геометрии электрода в результате действия одного электродного пятна $\Delta l_{n,k,a}$ (определяется по методике [1] или оценивается по графикам) и эффективного вероятного времени действия пятна на всей поверхности $\tau_{эфф}$ находим среднее изменение геометрии электрода за время выхода на стационарный режим ($r_{см}$) – $\Delta l_{смА.К.}$:

$$\Delta l_{смА.К.} = \frac{\Delta l_n \tau_{см}}{\tau_{эфф}}.$$

С учетом вероятностного характера распределения числа электродных пятен по радиусу катода из вольфрама (-) и молибдена (-) (рис. 1) и по образующей анода (рис. 2) получаем истинное изменение геометрии вследствие действия электродных пятен при выходе на стационарный режим:

$$\Delta l_{смА.К.} = P(N) \Delta l_n \tau_{см},$$

где $P(N)$ – вероятность появления пятен в той или иной части электрода, полученная на основе анализа экспериментальных данных и с учетом вероятности возникновения пятен.

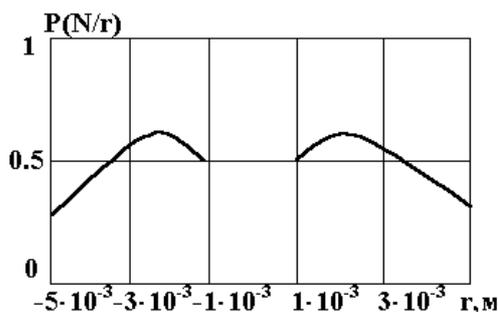


Рис. 1. Распределение вероятности появления электродных пятен по радиусу катода установки «ПУСК»

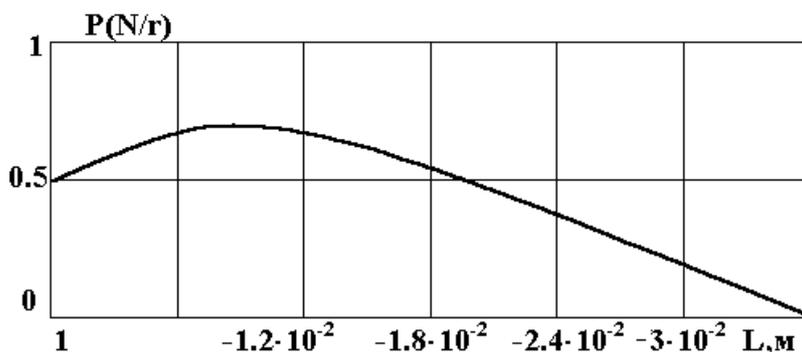


Рис. 2. Распределение вероятности появления электродных пятен по образующей анода установки «ПУСК»

Существенное изменение геометрии катода из вольфрама и молибдена по радиусу из-за действия электродных пятен (рис. 3) характерно для молибденового катода при выходе на стационарный режим. Изменение геометрии вольфрамового анода установки «ПУСК» по образующей в результате действия электродных пятен при выходе на стационарный режим (рис. 4) наиболее существенно для поверхностей вблизи катода, т.е. определяющее влияние на характер изменения геометрии оказывает действие пятен в той или иной части катода или анода.

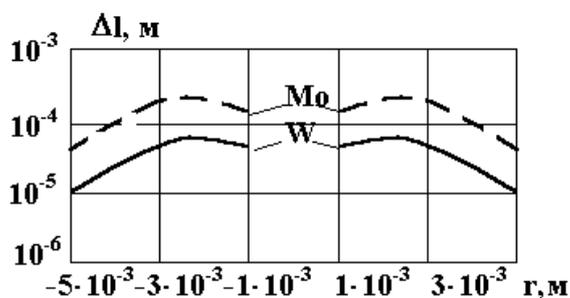


Рис. 3. Изменение геометрии катода установки «ПУСК» в результате действия электродных пятен на вольфрамовом (-) и молибденовом (- -) катодах

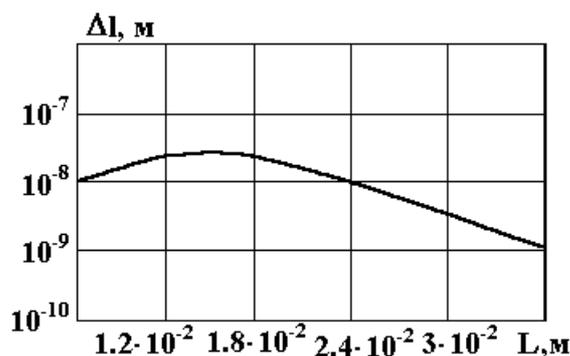


Рис. 4. Изменение геометрии вольфрамового анода установки «ПУСК» в результате действия электродных пятен

3.2. Изменение геометрии электродов установки «ПУСК» в результате действия заряженных частиц при выходе на стационарный режим

В режиме с электродными пятнами ток переносится также заряженными частицами, действующими вне электродных пятен, причем такой токоперенос составляет обычно 10...20 % полного тока. Тогда ток ионов и электронов на катод и анод определяется так:

$$I_{ie} = J_{K,A} K_{r,k,a} \quad (1)$$

где $K_{r,k,a}$ – коэффициент, учитывающий долю тока, переносимого частицами на катод или анод. Изменение геометрии катода и анода за время выхода на стационарный режим в результате действия заряженных частиц имеет вид

$$\Delta l_r = \int_0^{2t_{cm}} \frac{I_{i,e}(R, z, t) k [E_{i,e} j_{i,e}] ma}{e\gamma} dt. \quad (2)$$

На рис. 5 и 6 показано изменение геометрии катода по радиусу и анода по образующей в результате действия заряженных частиц в различные моменты времени выхода на стационарный режим ($t = 10; 40; 100; 125; 200; 300$ с).

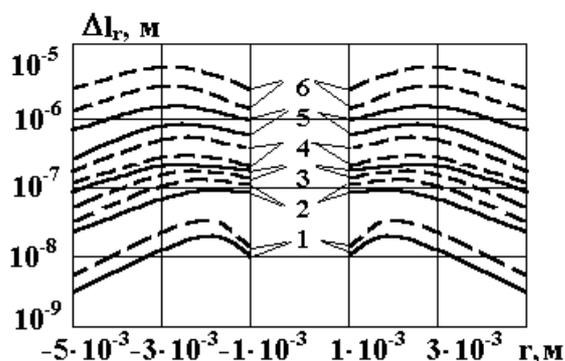


Рис. 5. Изменение геометрии молибденового (- -) и вольфрамового (-) катодов установки «ПУСК» за время выхода на стационарный режим в результате действия ионов: 1 – 10 с; 2 – 40 с; 3 – 100 с; 5 – 200 с; 6 – 300 с

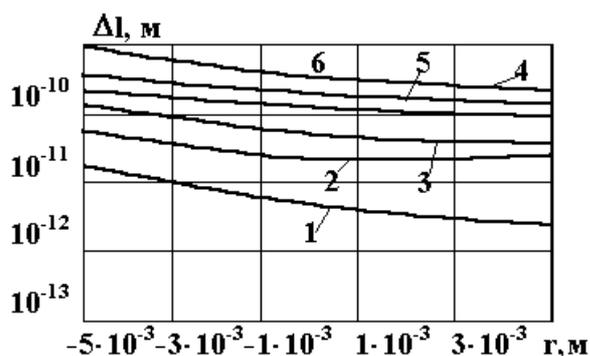


Рис. 6. Изменение геометрии анода установки «ПУСК» по образующей за время выхода на стационарный режим в результате действия электронов

Из рис. 5 видно, что для катода наиболее существенное влияние на изменение геометрии оказывает действие заряженных частиц при временах от 10 до 300 с, тогда как при временах до 10 с это действие является незначительным. Последнее связано с тем, что после 10 с перенос тока осуществляется только частицами, т.е. на катоде реализуется стационарный режим работы (разряд становится распределенным). Для анода картина несколько другая: здесь наблюдается равномерное изменение геометрии в результате действия частиц, так как стационарный режим достигается только к 250–300 секундам.

3.3. Тепловые потоки на электроды установки «ПУСК» в результате действия заряженных частиц и излучения плазмы и их влияние на изменение геометрии электродов

Характер распределения тепловых потоков вследствие действия заряженных частиц и излучения плазмы можно определить для импульсно-плазменного ускорителя (ИПУ) [3]. Для этого воспользуемся зависимостями, полученными в результате исследования тепловых потоков, действующих на катод и анод (рис. 7 и 8). На рис. 7 показано снижение во времени теплового потока, действующего на катод из вольфрама.

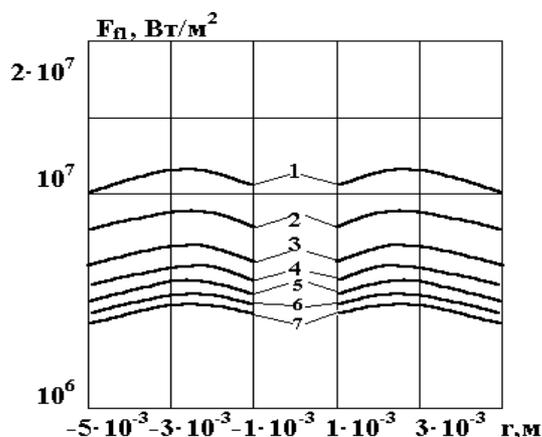


Рис. 7. Распределение теплового потока по радиусу катода установки «ПУСК» при выходе на стационарный режим: 1 – 0,025 с; 2 – 0,1 с; 3 – 0,25 с; 5 – 2 с; 6 – 5 с; 7 – 10 с

Распределение теплового потока по образующей анода установки «ПУСК» в различные моменты времени показано на рис. 8. Из рисунка видно, что с увеличением времени снижаются величины тепловых потоков, хотя характер распределения по образующей сохраняется.

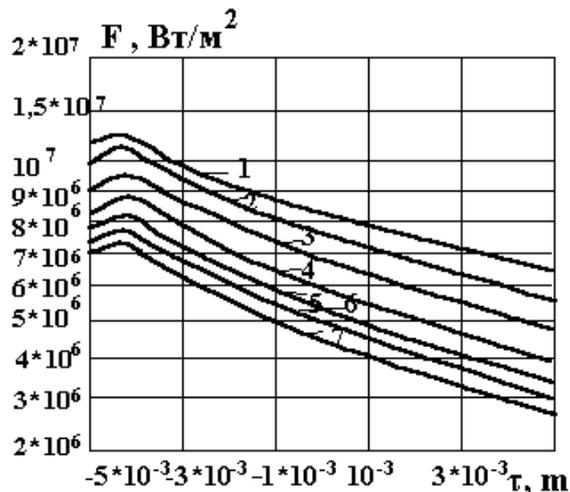


Рис. 8. Распределение температурного потока по образующей анода установки «ПУСК» при выходе на стационарный режим: 1 – 0,1 с; 2 – 1 с; 3 – 10 с; 4 – 50 с; 5 – 100 с; 6 – 150 с; 7 – 200 с; 8 – 3000 с

На рис. 9 изображены схемы теплообмена на поверхности катода и анода, а также показан элементарный объем электрода, в котором рассматривается баланс тепла. В балансе тепла учитываются теплопроводность, смещение фронта испарения, джоулев нагрев и энергия деформирования и он имеет вид

$$\frac{dT(r,z,t)}{dt} = a\Delta T(r,z,t) + V_{\phi 1} \left. \frac{\partial T(r,z,t)}{\partial r} \right|_I - V_{\phi 2} \left. \frac{\partial T(r,z,t)}{\partial r} \right|_I + \frac{\rho [T(r,z,t)]}{C_V [T(r,z,t)]} \cdot j^2(r,z,t) + \frac{I}{C_V} \cdot \frac{\partial W(r,z,t)}{dt},$$

где
$$\Delta T(r,z,t) = \frac{\partial^2 T(r,z,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T(r,z,t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T(r,z,t)}{\partial z^2}. \tag{3}$$

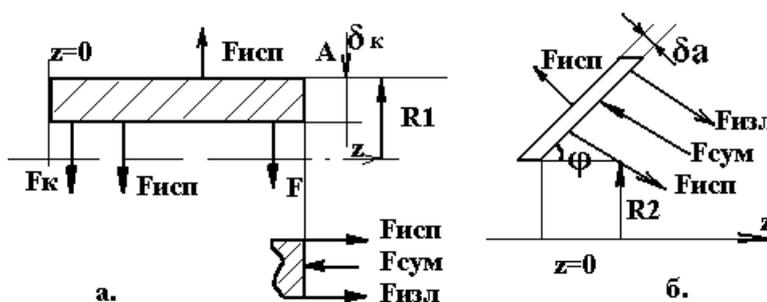


Рис. 9. Схема действующих тепловых потоков на катод (а) и анод (б) установки «ПУСК»

Лапласиан зависит только от z и r , так как принята угловая симметрия. Запишем граничные условия.

Для катода $r = R_1$

$$-\frac{\partial T(r, z, t)}{\partial t} = \frac{1}{\lambda} \left(-F_{ucn} - \sigma \varepsilon T_{(R, r, z, t)}^4 - F_k \right); \quad (4)$$

на поверхности $r = R_1 + \delta$

$$-\frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} = \frac{1}{\lambda} \cdot (-F_{ucn}); \quad (5)$$

на поверхности $z=l$

$$-\frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} = \frac{1}{\lambda} \cdot (F_2 - F_{ucn1} - \sigma \cdot \varepsilon \cdot T^4(r, e, t)); \quad (6)$$

на поверхности $z=0$

$$-\frac{\partial T(r, z, t)}{\partial z} = \frac{1}{\lambda} \cdot F_{mk}. \quad (7)$$

Для анода:

на поверхности $r = r_p = R_2 + z \operatorname{tg} \phi$

$$-\frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} = \frac{1}{\lambda} \cdot (F_2 - F_{ucn} - \sigma \cdot \varepsilon \cdot T_{(rp, z, t)}^4 - \varepsilon_n T_n^4); \quad (8)$$

на поверхности $r = r'_p = r_p + \delta_2$

$$-\frac{\partial T(r, z, t)}{\partial z} = \frac{1}{\lambda} \cdot (-F_{ucn}); \quad (9)$$

на поверхности $z = L \cdot \operatorname{ctg} \phi = z_k$

$$-\frac{\partial T(r, z, t)}{\partial z} = \frac{1}{\lambda} \left(-F_{ucn} - \sigma \varepsilon T_{(r, z_k, t)}^4 \right); \quad (10)$$

на поверхности $z = 0$

$$-\frac{\partial T(r, z, t)}{\partial z} = -\frac{1}{\lambda} F_{mД}. \quad (11)$$

Плотность тока в исследованном сечении катода считается постоянной, а в материале анода она определяется выражением

$$j(z, t) = \sum_{i=1}^m I_n \cdot N(z, t) \frac{1}{2\pi(R_\Sigma + z \operatorname{tg} \phi) \delta_A}, \quad (12)$$

т.е. все сечение участвует в токопереносе одинаково.

3.4. Анализ задачи термоупругости в электродах установки «ПУСК»

В связи с тем, что задачи термоупругости на катодах ИПУ [3] и установки «ПУСК» идентичны, то рассмотрим задачу для конического анода. Учитывая малую толщину анода, его можно представить как коническую оболочку, для которой используется система уравнений термоупругости из работы [1]:

$$S^2 \frac{d^2 \chi}{dS^2} + S \frac{d\chi}{dS} - \chi = \delta^2 \frac{\text{ctg} \beta}{4k} \rho Q + \alpha(1 + \mu) \rho^2 \sin \beta \frac{d}{dz} \frac{dT(r, z, t)}{dS};$$

$$S^2 \frac{d^2 Q}{dS^2} + S \frac{dQ}{dS} - Q = \frac{4E}{\delta} \left(S \text{ctg} \beta x + \alpha S^2 \frac{dT(r, z, t)}{dS} \right), \quad (13)$$

где $dS = rd\beta$ – элементарная дуга, отсчитываемая от вершины конуса; $\varphi = \pi/2 - \beta$; $S = \text{ctg} \beta$ – текущий радиус оболочки; $\delta_A = \text{const}$ – толщина оболочки;

$$\chi = \frac{dw}{dS}, q = \frac{Q\delta^2}{4R}; k = \frac{E\delta^2}{12(1 - \mu^2)}.$$

Выражения для моментов и усилий запишем в виде

$$n_\phi = n_\rho = -q \text{tg} \beta; n_\nu = -\frac{d(q\rho)}{dS};$$

$$m_\phi = m_\rho = -k \left[\frac{d\chi}{dS} + \frac{\mu}{S} - \alpha(1 + \mu) \frac{dT}{d\rho} \sin \beta \right];$$

$$m_\nu = -k \left[\frac{\chi}{\rho} + \mu \frac{d\chi}{dS^2} - \alpha(1 + \mu) \frac{dT}{dS} \sin \beta \right]. \quad (14)$$

По величинам моментов и усилий находим напряжения в конической оболочке:

$$\sigma_{\nu\nu} = -\frac{\sin^2 \beta}{S} \frac{dm}{dS};$$

$$\sigma_{0S} = -\frac{dq}{d\rho} \sin \beta; \quad (15)$$

$$\sigma_{\nu S} = -\frac{dq}{dS} \sin \beta \text{tg} \beta.$$

По этим выражениям определяем температурные напряжения в аноде установки «ПУСК». Как показал численный анализ, касательные напряжения малы, а нормальные напряжения вдоль образующей конуса – $\sigma_{LL} \sqrt{\sigma_{SS}^2 + \sigma_{\nu\nu}^2}$. В дальнейшем рассматриваем только эти напряжения.

Совместное решение задач теплопроводности и термоупругости позволяет получить поля температур и напряжений, а также изменение геометрии катода и анода за время выхода ТХУ на стационарный режим. Температурные поля на катоде из молибдена (-) и вольфрама (- -) на его торцевой поверхности показаны на рис. 10. Из рисунка следует, что температура поверхности растет, а характер распределения температур принципиально не меняется.

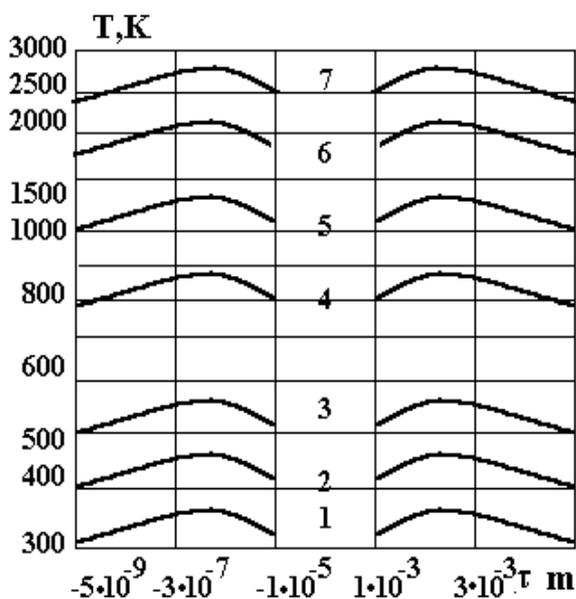


Рис. 10. Распределение температур по поверхности катода установки «ПУСК» по радиусу: 1 – 0,025 с; 2 – 0,1 с; 3 – 0,25 с; 5 – 2 с; 6 – 5 с; 7 – 10 с

Неоднородность температурных полей наблюдается по образующей анода (рис. 11) в различные моменты времени: 1 – $t = 0,1$; 2 – $t = 1$; 3 – $t = 10$; 4 – $t = 50$; 5 – $t = 100$; 6 – $t = 200$; 7 – $t = 300$ с.

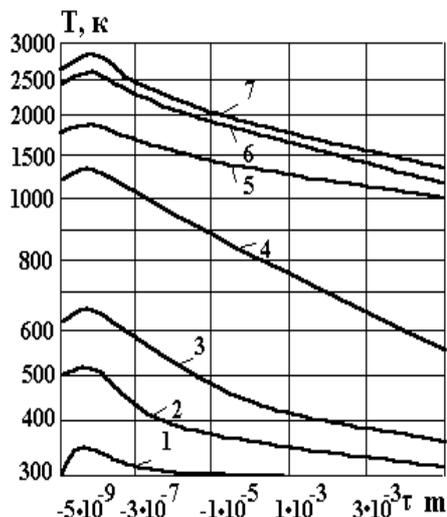


Рис. 11. Распределение температур по образующей анода ТХУ: 1 – 0,1 с; 2 – 1 с; 3 – 10 с; 5 – 100 с; 6 – 200 с; 7 – 3000 с.

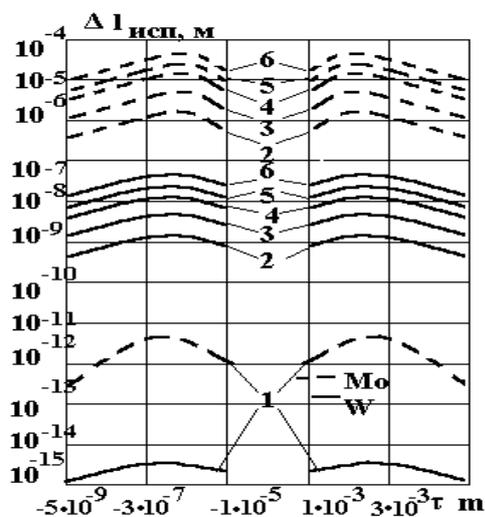


Рис. 12. Изменение геометрии молибденового (- -) и вольфрамового (-) катодов ТХУ во время выхода на стационарный режим.

Изменение геометрии вольфрамового (-) и молибденового (- -) катода по радиусу в результате испарения (рис. 12) в различные моменты времени определяется по методике предыдущего параграфа. Изменение геометрии в результате испарения существенно для молибденового катода, а для вольфрамового оно незначительно. Изменение геометрии анода вдоль образующей вследствие испарения показано на рис. 13. Для вольфрама во все

исследованные моменты времени такое изменение мало, исключение составляет малый участок анода вблизи катода, на котором испарение оказывает влияние на изменение геометрии.

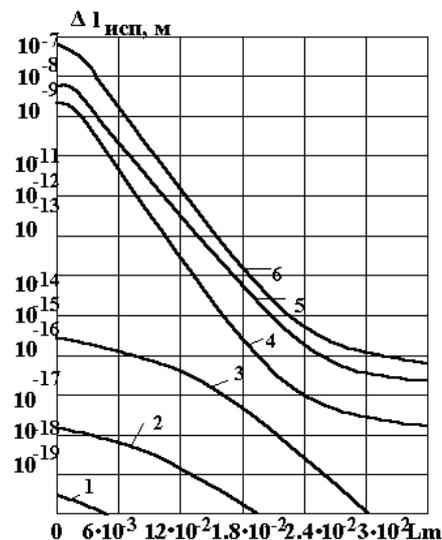


Рис. 13. Изменение геометрии анода установки «ПУСК» по образующей при выходе на стационарный режим

3.5. Динамика изменения геометрии и температурных напряжений при выходе на стационарный режим

Исследование динамики изменения температурных напряжений на электродах установки «ПУСК» свидетельствует о том, что величины температурных напряжений далеки от предела прочности (рис. 1), хотя возможно термоусталостное разрушение охрупченного материала из-за значительного роста зерна. Микрофотографии структур вольфрама, проработавшего 20 часов в качестве электрода и в первоначальном состоянии, показаны на рис. 1.

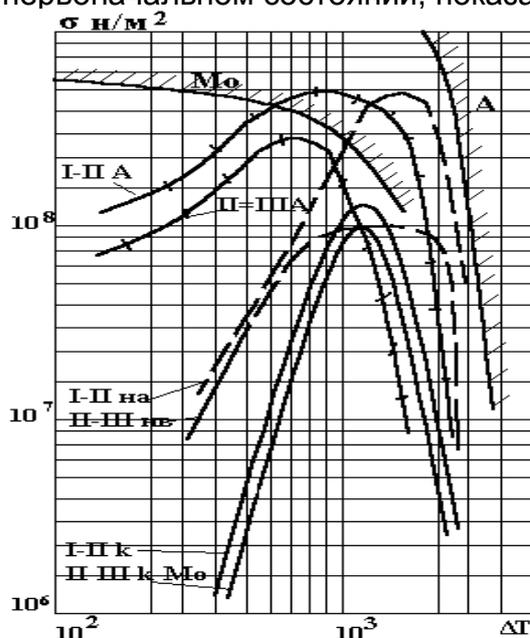


Рис. 14. Зависимость действующих напряжений и предел прочности от температуры катода (-), анода (- -) и нейтральной вставки (+)

4. Расчет ресурса электродов установки «ПУСК» и экспериментальная проверка модели

Ресурс электродных систем определяется двумя процессами: изменением геометрии электродов и термоупругим разрушением электродных систем при наличии внешних нагрузок на электроды. В первом случае достижение ресурса сопряжено с реализацией критического изменения геометрии электрода, т.е. выполнением условий

$$\Delta l = \Delta l_{kpp} \quad \text{или} \quad \Delta l_A = \Delta l_{Akp} . \quad (16)$$

Тогда

$$T_{Pk} = \frac{\Delta l_k P_k - \Delta l_{н.ст}}{V_{эк_{max}}} + t_{н.ст}; \quad (17)$$

$$T_{PA} = \frac{\Delta l_{кра} - \Delta l_{н.ст}}{V_{а_{max}}} + t_{A_{ст}}, \quad (18)$$

где $t_{н.ст}$ – время достижения стационарного режима на катоде и аноде.

Во втором случае эквивалентные напряжения $\sigma_{экв}$, зависящие от всех действующих напряжений, сравниваются с пределом прочности материала электрода $\sigma_{ВД}$.

Это условие запишем так:

$$\sigma_{экв} > \sigma_{ВД}. \quad (19)$$

Время t , соответствующее разрушению, т.е. выполнению условия равенства напряжений, является ресурсом. Нахождение эффективных напряжений связано с выбором гипотезы прочности и направления действия внешних напряжений $\sigma_{вн}(t)$. Так, напряжение в случае применения третьей гипотезы прочности и при действии внешних нагрузок в направлении оси r ($\sigma_{rr} = 0$) имеет условие

$$\sigma_{экв} = \sqrt{(\sigma_{zz}^2 + \sigma_{\theta\theta}^2)} + 4\sigma_{zz} \leq \sigma_{\theta\theta}'.$$

По первому условию рассчитываем ресурс электродов установки «ПУСК», который составляет: для молибденового катода – 5,55, вольфрамового – 275, а для вольфрамового анода – 695 часов. Экспериментальный ресурс молибденового катода составляет 5,3 часа, что близко к расчетному.

Проведем сравнение характера изменения геометрии, полученного расчетным и опытным путем. После двухчасовой работы электродов наблюдается соответствие между теоретическим и экспериментальным характером изменения геометрии катода (рис. 15) и анода (рис. 16).

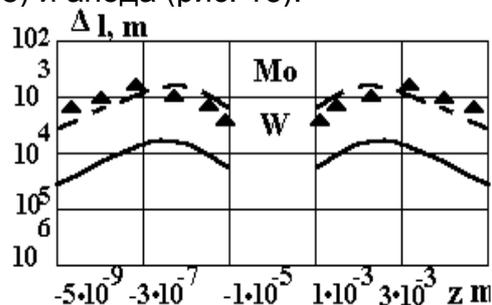


Рис. 15. Теоретическое и экспериментальное изменение геометрии молибденового и вольфрамового катодов установки «ПУСК» по радиусу за два часа работы

Таким образом, рассмотренную методику можно использовать для расчета ресурса электродов установки «ПУСК».

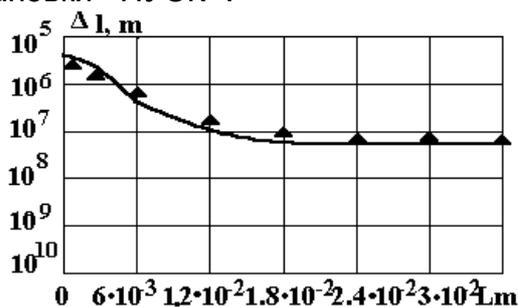


Рис. 16. Теоретическое и экспериментальное изменение геометрии вольфрамового анода установки «ПУСК» по образующей за два часа работы

Выводы

1. Разработана модель прогнозирования ресурса электродов технологической установки «ПУСК», которая учитывает действия электродных пятен, испарение, распыление, температурные напряжения в теле электродов.

2. Проведено сравнение изменения геометрии катода и анода полученное теоретически и в эксперименте дает высокое согласие результатов, что говорит о адекватности модели и ее работоспособности.

Список литературы

1. Плазменные ускорители [Текст] учеб. / под ред. Л. Арцимовича. – М.: Машиностроение, 1972. – 315 с.
2. Дороднов, А. Плазменные технологические установки [Текст] / А. Дороднов. – М.: МВТУ им. Баумана, 1975. – 105 с.
3. Костюк, Г.И. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий [Текст] Кн. 1: Физические процессы плазменно-ионных, ионно-лучевых, плазменных, светолучевых и комбинированных технологий / Г.И. Костюк. – К.: Изд-во АИНУ, 2002. — 596 с.
4. Костюк, Г.И. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий [Текст] Кн. 2: Справочник для расчета основных физических и технологических параметров, оценки возможностей, выбора типа технологий и оборудования / Г.И. Костюк. – К.: Изд-во АИНУ, 2002. — 482 с.
5. Белан, Н.В. Физические основы стойкости электродов плазменных ускорителей и технологических плазменных устройств [Текст]: учеб. для вузов / Н.В. Белан, Г.И. Костюк, Е.П. Мышелов – Х.: Харьк. авиац. ин-т, 1986. – 206 с.
6. Аксенов, И.И. Вакуумная дуга [Текст] / И.И. Аксёнов. – К.: Наук. думка, 2012. – 727 с.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.И.Долматов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков
Поступила в редакцию 19.09.2013

Прогнозування ресурсу електродів в технологічній установці «ПУСК» і динаміка теплофізичних, термомеханічних і ерозійних процесів

Розроблено модель прогнозування ресурсу електродів установці «ПУСК», яка враховує дію електродних плям, випарювання, розпилення матеріалу, напружений стан електродів та їхню ерозію у режимах виходу на стаціонарний режим та у стаціонарному режимі.

Ключові слова: електродні плями, стаціонарний режим, випромінювання плазми.

Life prediction of electrodes in the process plant "START" and the dynamics of thermal, thermomechanical and erosion

A model for predicting resource electrode set "Switch", which takes into account the effect of the electrode spots, evaporation, sputtering, stress and erosion of the electrodes in the output mode for steady-state and in the steady state.

Keywords: electrode patches, steady-state, the plasma radiation.