

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВНУТРЕННЕГО ЭЛЕКТРОДА КООКСИАЛЬНОГО ПЛАЗМЕННОГО УСКОРИТЕЛЯ С ПРОДОЛЬНОМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

В.Б. Юферов, Н.А. Косик, Е.В. Муфель, В.Ф. Тихонов, В.И. Ткачев, В.А. Сероштанов, С.В. Шарый

Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт"
Харьков, Украина

Проведены исследования тепловых характеристик внутреннего электрода коаксиального плазменного ускорителя с продольным магнитным полем, работающим в медленном режиме. Получены зависимости тепловыделений от величин электрических напряжений на разряде, величин магнитного поля, определены аксиальные тепловыделения, установлен несимметричный плазмоперенос, рассчитана динамика температуры поверхностного слоя.

PACS: 52.50.Dg

Модификация структуры металлов под действием высокоэнергетических электронных пучков, СЭП, – известна. Из-за быстрого охлаждения расплавленных поверхностных слоев металла получается мелкозернистая или даже аморфная структура, благодаря чему существенно изменяются все структурно зависящие свойства. Например, в [1] эти исследования проводились при параметрах электронных пучков: энергия – 270...300 кэВ, плотность тока около 100 А/см², длительность импульса – 1 мкс. Толщина модифицированного слоя, как правило, превышает толщину слоя торможения электронов и в большинстве случаев лежит на уровне 0.1...3 мм. Поэтому для обработки тонкостенных изделий необходимо снижение энергии электронов или необходим переход на ионы, имеющие значительно меньшую глубину пробега. Снижение энергии упростит также вопросы радиационной безопасности. В то же время снижение энергии требует повышения плотности тока или длительности импульса, что видно при рассмотрении выражения: $q = IEt = mc\Delta T$, где q – удельная энергия, I – плотность тока пучка, E – энергия, τ – длительность импульса, $m = \rho s\delta$ соответственно – масса, плотность, удельная площадь и толщина слоя, c – теплоемкость, ΔT – разность температур, приблизительно равная температуре плавления материала. Повышение плотности тока требует повышения плотности плазмы, эмитирующей бомбардирующие частицы и снижения расстояния облучаемый электрод – плазма, которое в принципе может быть снижено до величины Дебаевского радиуса, т.е. облучаемое тело находится в плазме (окружено ею). В [2] описан плазменный катод, применение которого, возможно, позволит решить эти проблемы и его конструкция может быть положена в основу установки для обработки изделий сложной формы и тонкостенных конструкций. Предварительные исследования проводились в системе коаксиального плазменного ускорителя с продольным магнитным полем [3], Рис.1, хотя было ясно, что в ней будет происходить аксиальный перенос плазмы за счет силы Ампера. Разряд поджигался между коаксиальными электродами при давлении в камере $5 \cdot 10^{-2} \dots 5 \cdot 10^{-3}$ Торр с помощью конденсаторной батареи

емкостью около 10^3 мкф и напряжением до 3 кВ. Конструкция установки позволяет в ходе работы реализовать: 1) облучение электронами или ионами, 2) изменять энергию и ток, 3) регулировать и контролировать вакуумные условия, 4) контролировать параметры плазменного катода.

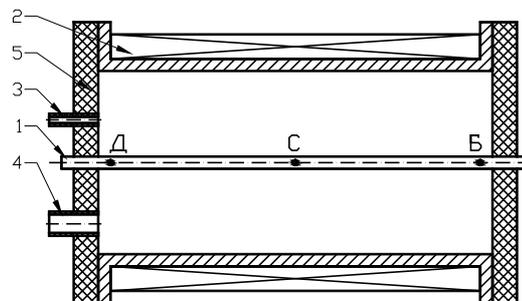


Рис.1. Схема рабочей камеры. 1 – центральный электрод, трубка $\varnothing 10/9.4$; 2 – магнитная система, 3 – напуск газа; 4 – откачка; 5 – изоляторы

Токовые характеристики разряда и свечение плазмы представлены на Рис.2, а и б. Видно, что максимумы на кривых свечения совпадают с максимумами разрядных токов.

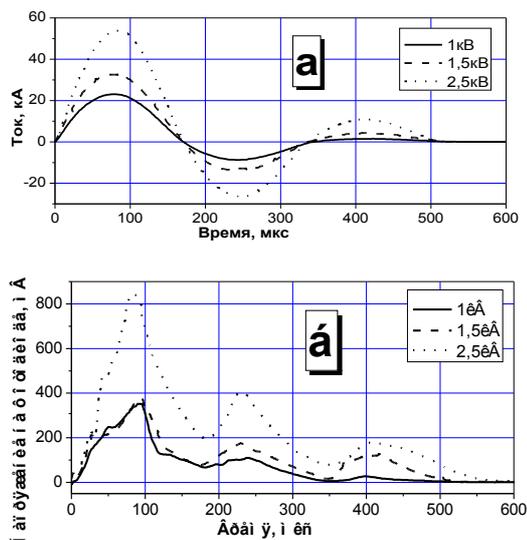


Рис.2. а) разрядный ток; б) свечение плазмы

Поскольку интенсивное свечение плазмы не позволяло измерять светимость (температуру) центрального электрода, контроль величины энергии, переносимой на центральный электрод, производился с помощью 3-х термопар, Д,С,Б, вставленных внутрь центральной трубки, залитой жидкостью (водой) (см. Рис.1). Время установления температурного равновесия в металле и воде определялось исходя из решения уравнения теплопроводности:

$q = -\chi dT/dx$, $t = \text{Const } d^2/\chi$, где $\chi = \lambda/\rho c$ и λ – коэффициенты температуро и теплопроводности, соответственно; d – характерный размер по оси x . Эти времена для металла и воды составляли, соответственно, 1...3 мс и 10с.

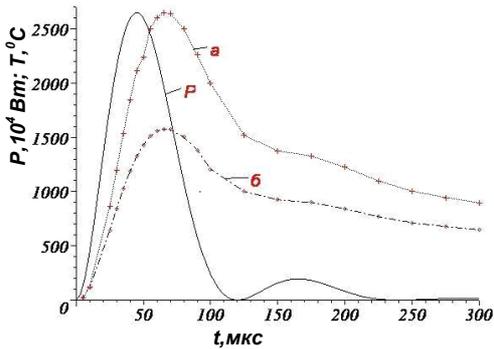
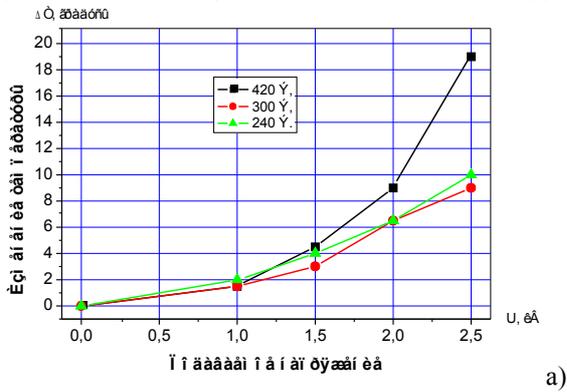
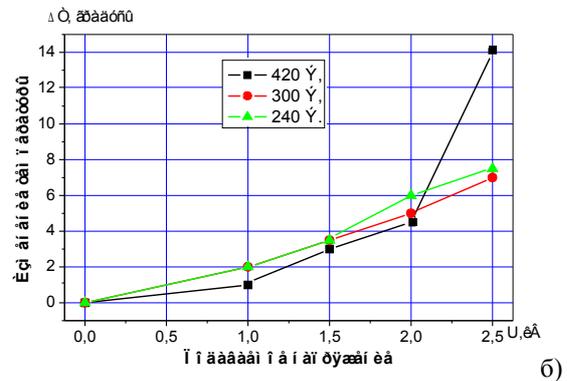


Рис.3. Временные зависимости мощности P и температуры приповерхностного слоя T : а) T для постоянных c, ρ, λ ; б) для c, ρ, λ , зависящих от T

Временные зависимости мощности разряда, P , и рассчитанные температуры, T , приповерхностного слоя толщиной 0.5 мкм для $q = 16$ Дж/см² представлены на Рис.3: а) для постоянных c, ρ, λ ; б) для паспортных значений c, ρ, λ , зависящих от температуры.



а)



б)

Рис.4. Изменения равновесной температуры центрального электрода: а) положительная полярность; б) отрицательная полярность

Выбор толщины слоя в 0.5 мкм получен из оценок величины тормозного пути электронов с энергией около 1 кэВ для железной мишени. Как видно, модификация физико-механических свойств слоя возможна при температурах плавления материала ниже 1500°С.

На графиках Рис.4,а,б показаны изменения равновесной температуры центрального электрода после импульса в зависимости от разрядного напряжения и магнитного поля.

На Рис.5 представлены величины равновесной температуры в местах расположения термопар, Б,С,Д, согласно Рис.1, при симметричном токоподводе. Не симметричный токоподвод увеличивал неоднородность выхода частиц на центральный электрод в осевом направлении.

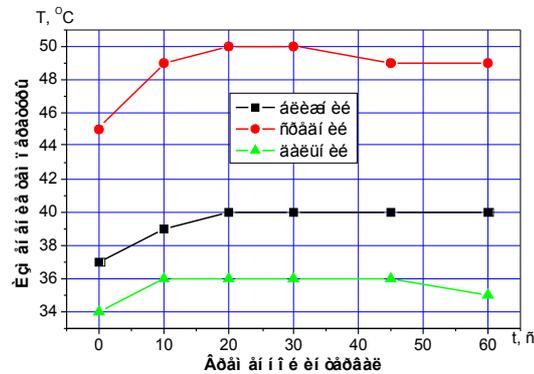
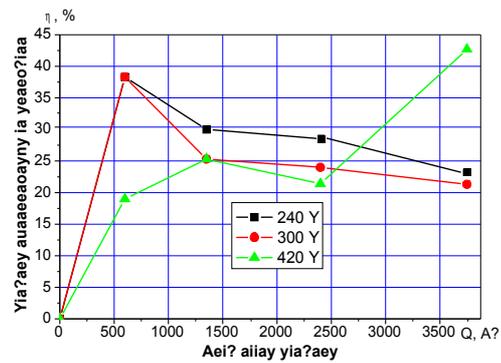
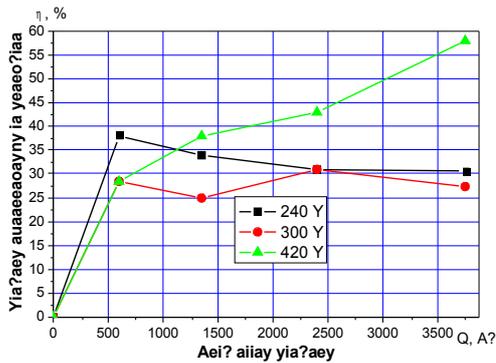


Рис.5. Температурный ход трех термодатчиков, Б,С,Д (положительная полярность)

Роль величины продольного магнитного поля представлена на Рис.6,а и б.



а)



б)

Рис.6. Доля энергии, выделяющейся на электроде для а) отрицательной и б) положительной полярностей

На Рис.7 представлено фото бокового изоляционного фланца, облученного плазмой, противоположный – оказывался не облученным, что указывает на аксиальное перемещение плазмы.

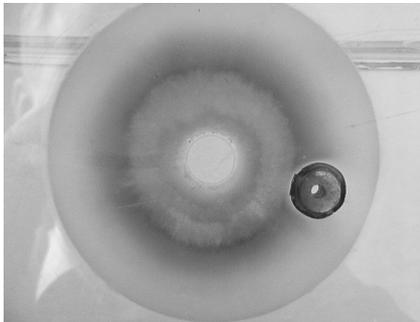


Рис.7. Следы эрозии изоляционного фланца

На Рис.8 представлены следы эрозии на внешнем коаксиальном электроде при заземленном плюсе источника.



Рис.8. Эрозионные характеристики разряда

Наблюдаемые катодно-анодные пятна поставляют большое количество металлических ионов в разрядную плазму, что является отрицательным моментом.

ВЫВОДЫ

Для коаксиального плазменного ускорителя с продольным магнитным полем, работающим в медленном режиме, возможно получение зоны максимального энерговыделения в центральной части внутреннего электрода. Целесообразны исследования в более широком диапазоне параметров. Целесообразны расчеты температурной динамики для более коротких импульсов с целью оптимизации процесса и систем питания. Импульсная обработка тонкостенных трубчатых изделий высокоточными плазменными разрядами с удовлетворительной однородностью – возможна. Она зависит от многих условий: величины и геометрии магнитного поля, величины давления и состава газа и др. Такая многопараметровая зависимость требует тщательного контроля таких важных параметров, как поверхностная температура (импульсная), время экспозиции, которые определяют структуру и толщину модифицированного слоя. Поэтому оптимизация условий требует постоянного структурного контроля и использования широкого класса диагностик.

ЛИТЕРАТУРА

- И.М. Неклюдов, В.Б. Юферов, Л.Г. Сороковой и др. О некоторых процессах при воздействии импульсного электронного пучка с поверхностями твердых тел. Физика импульсных разрядов в конденсированных средах // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Плазменная электроника и новые методы ускорения*. 2004, №4(4), с.326-328.
- В.Б. Юферов, Е.И. Скибенко, Л.Г. Сороковой и др. Импульсный плазменный катод с большой эмитирующей поверхностью // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Плазменная электроника и новые методы ускорения*. 2004, № 4(4), с.319-322.
- V.B. Yuferov, V.I. Tkachev, V.F. Tikhonov, et al. Technological coaxial plasma accelerator // *Problems of Atomic Science and Technology. Series: Nuclear Physics Investigation*. 2006, №2(46), p.49-51.

ANALYSIS OF THE THERMAL CHARACTERISTICS OF INTERNAL ELECTRODE USED FOR THE COAXIAL PLASMA ACCELERATOR WITH LONGITUDINAL MAGNETIC FIELD

V.B. Yuferov, N.A. Kosik, E.V. Mufel, V.F. Tikhonov, V.I. Tkachev, V.A. Seroshtanov, S.V. Shariy

Thermal characteristics of internal electrode used for the slow-mode operating coaxial plasma accelerator with longitudinal magnetic field have been analyzed. The dependences of heat release on values of electric discharge voltage and magnetic field have been obtained. The axial heat releases have been determined. Asymmetric plasma transfer has been established. Surface layer temperature dynamics has been calculated.

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВНУТРІШНЬОГО ЕЛЕКТРОДА КОАКСІАЛЬНОГО ПЛАЗМОВОГО ПРИСКОРЮВАЧА З ПОВЗДОВЖНІМ МАГНІТНИМ ПОЛЕМ

В.Б. Юферов, М.А. Косик, Є.В. Муфель, В.Ф. Тихонов, В.І. Ткачов, В.А. Сєроштанов, С.В. Шарій

Проведено дослідження теплових характеристик внутрішнього електрода коаксіального плазмового прискорювача з повздовжнім магнітним полем, що працює в повільному режимі. Отримано залежності

тепловиділень від величин електричних напруг на розряді, величин магнітного поля, визначено аксіальні тепловиділення, встановлено несиметричний плазмопереніс, розрахована динаміка температури поверхневого шару.