

Образование микроструй в катодных пятнах вакуумной дуги

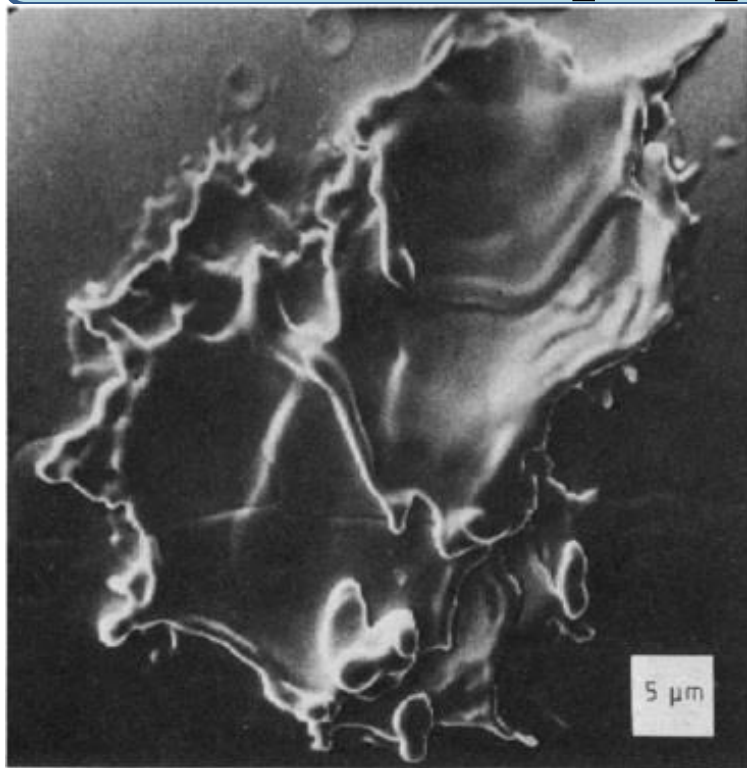
Гашков М.А., Зубарев Н.М., Зубарева О.В., Месяц Г.А., И.В. Уйманов

Институт Электрофизики УрО РАН
Лаборатория нелинейной динамики

*E-mail: gashkov@ier.uran.ru

18-я Конференция молодых ученых ИЭФ УрО РАН
Екатеринбург 2016

Микрократеры на катоде



Поверхность катода

V.F.Pushkarev, A.M.Murzakaev. // J. Phys. D: Appl. Phys. 23. – 1990. – 23 26. – pp.26-35.



“Корона”

G.E.Cossalli, A.Cogne, M.Marengo. // Exp. In Fluids. – 1997. – 12. – pp.463 –472.

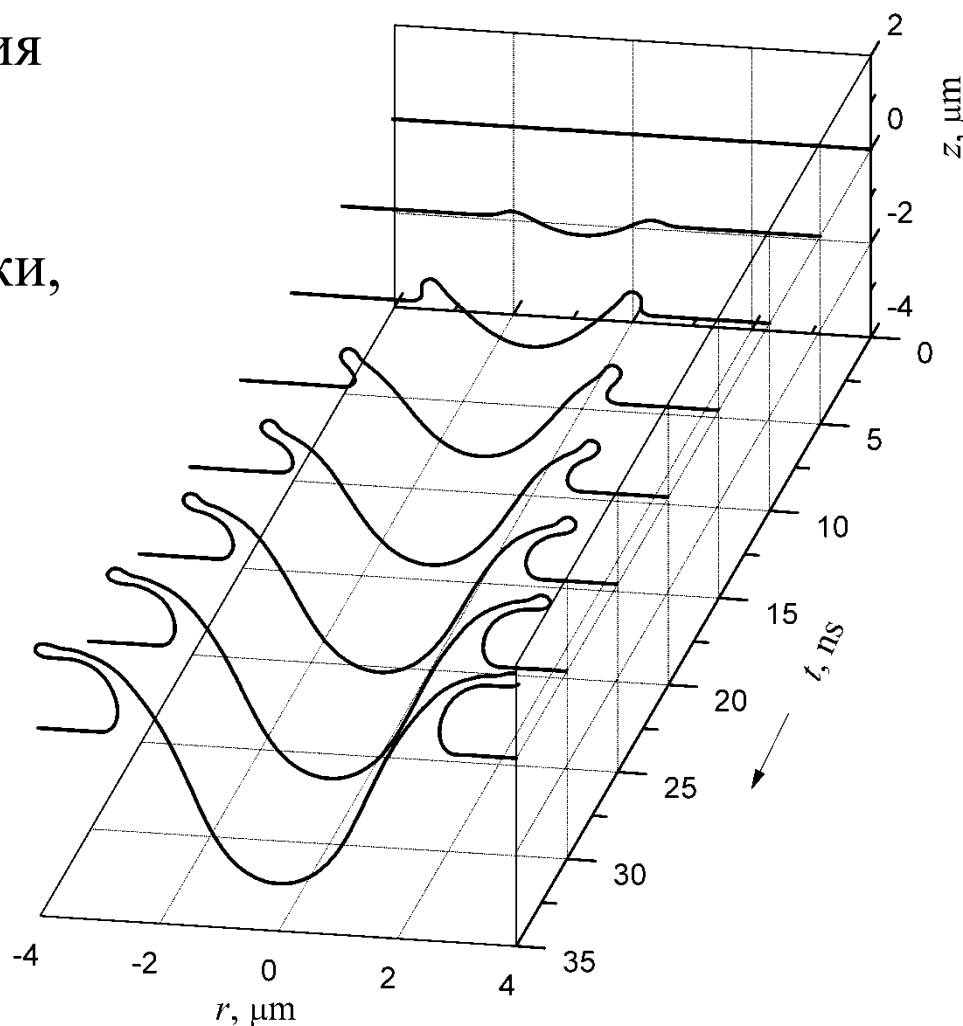
Согласно концепции, развиваемой Г.А. Месяцем, самоподдержание вакуумного дугового разряда происходит за счёт формирования микроструй, микрокапель при выдавливании жидкого металла из кратеров. Подобные микронеоднородности обеспечивают условия для взрывной электронной эмиссии.

План работы:

1. Выяснение механизмов образования жидкометаллических струй в катодном пятне вакуумного дугового разряда с использованием данных численного моделирования
2. Нахождение пороговых условий для формирования струй в катодных пятнах вакуумной дуги из предложенной качественной модели

Результаты численного моделирования

- Моделирование образования единичного кратера происходит в рамках полуэмпирической методики, предложенной в [*]
- На рисунке: расчёт образования кратера для медного катода с током ячейки 3.2 А
(пороговый ток 1.6 А)
- При $t = 10$ нс по контуру кратера образуется жидкометаллический вал



* Месяц Г.А., Уйманов И.В. // Известия вузов. Физика. 2015. Т. 58. В. 9/2. С. 204-208.

Механизмы развития неустойчивости

Неустойчивость Рэля-Плато

Неустойчивость Рэля-Тэйлора

$$\gamma_k^2 = \frac{\sigma}{\rho r_0^3} \frac{I_1(kr_0)}{I_0(kr_0)} (kr_0 - k^3 r_0^3)$$

- Стремится минимизировать площадь свободной поверхности
- В классическом случае приводит к разбиению цилиндра на капли

$$\gamma_k^2 = ak - \sigma k^3 / \rho$$

- Жидкость в кромке вала движется с отрицательным ускорением $\sim 2 \cdot 10^9 \text{ м/с}^2$.
- В этом случае возможно развитие неустойчивости РТ при движении свободной границы жидкого металла

*где γ_k – инкремент неустойчивости, k – волновое число, I_0 и I_1 – модифицированные функции Бесселя первого рода, σ – коэффициент поверхностного натяжения, ρ – плотность жидкости

Учёт растяжения

Спектр возмущений вала дискретен: $k_n(t) = \frac{n}{R(t)}$

$$\gamma_n^2 = \frac{\sigma}{\rho r_0^3} \frac{I_1(nr_0/R)}{I_0(nr_0/R)} \left[\frac{nr_0}{R} - \left(\frac{nr_0}{R} \right)^3 \right] \quad \gamma_n^2 = \frac{an}{R} - \frac{\sigma n^3}{\rho R^3}$$

$$R = R(t)$$

Поправка $s(t)$ ответственна
за уменьшении

$r_0 = r_0(t) \Rightarrow \gamma_n = \gamma_n(t)$ азимутальной амплитуды
 $a = a(t)$ возмущения за счёт
растяжения вала.

$$\frac{d \ln A_n}{dt} = \gamma_n(t) + s(t)$$

I. Растяжение вала никак **не**
влияет на амплитуды возмущений

$$s = s_{\max} = 0$$

$$s(t) = ?$$

II. Амплитуды возмущения вала
прямо пропорциональны радиусу
тора: $A_{n,\min}(t) \sim r_0(t)$

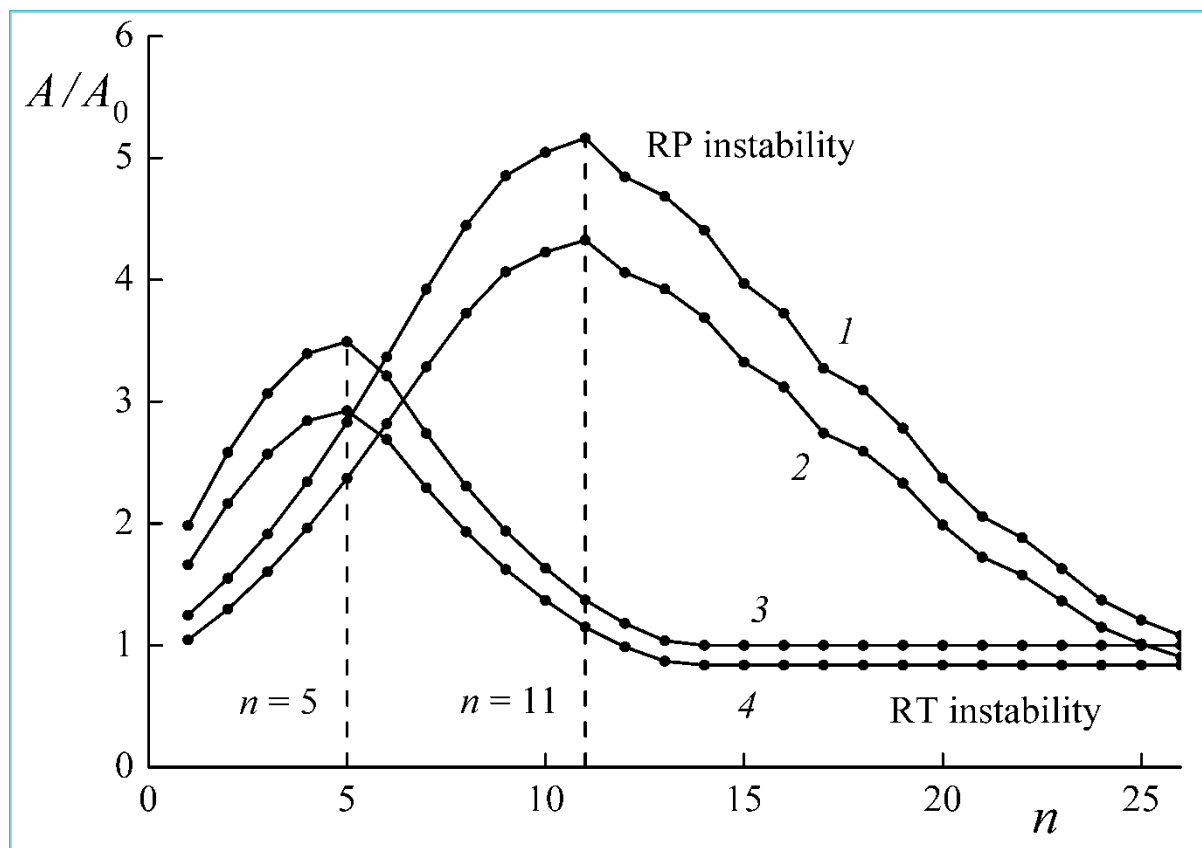
$$s = s_{\min}(t) = \frac{d \ln r_0(t)}{dt} < 0$$

Амплитуды возмущений

Верхняя и нижняя оценки имеют вид $\frac{A_{n,\max}(t)}{A_n(t_0)} = \exp\left(\int_{t_0}^t \gamma_n(t') dt'\right)$, $\frac{A_{n,\min}(t)}{A_n(t_0)} = \frac{r_0(t)}{r_0(t_0)} \exp\left(\int_{t_0}^t \gamma_n(t') dt'\right)$

$$A_{n,\min}(t) \leq A_n(t) \leq A_{n,\max}(t)$$

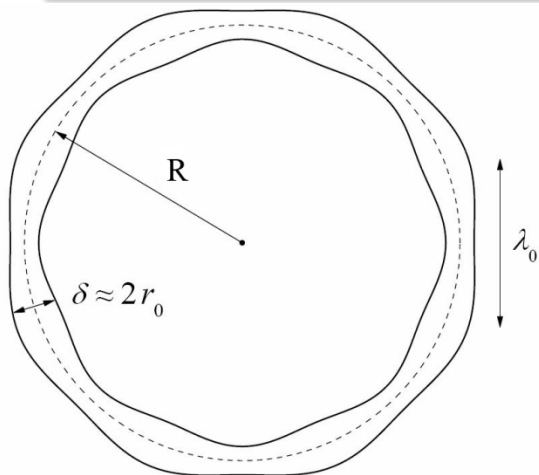
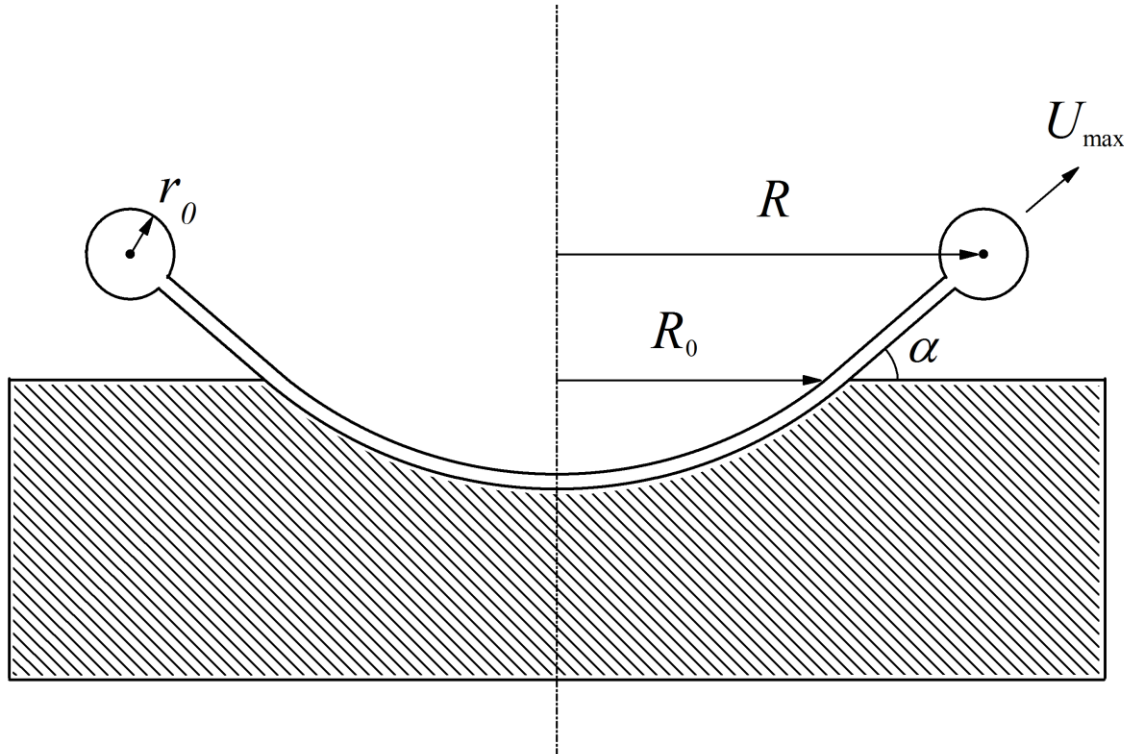
- Наибольший рост соответствует гармоникам с номерами от 8 до 14
- Наиболее вероятное число струй = 11
- За образование струй ответственна неустойчивость РП
- Характерное время развития **РП 14** нс, **РТ 21** нс



Геометрия задачи

Качественная модель
включает в себя два
этапа:

- **Образование жидкометаллического вала** под давлением плазменного факела
- **Распад вала на струи** в результате развития неустойчивости РП



Основные положения модели:

1. Кратер – усечённая полусфера с заданным углом α , под которым выплёскивается жидкий металл
2. Движение металла вне кратера инерциально
3. Кромка вала под действием капиллярных сил вдавливается и принимает форму тора, в котором сосредоточена вся масса жидкости вне кратера ⁸

Условие расплёскивания жидкого металла

По мере роста вала жидкий металл будет тормозиться капиллярными силами.

Прирост потенциальной энергии происходит за счёт уменьшения кинетической:

$$\Delta E_{surf} = -\Delta E_{kin}$$

Уменьшение кинетической энергии не должно превышать её исходное значение:

$$E_{kin} \geq -\Delta E_{kin}$$

$$E_{kin} \geq \Delta E_{surf}$$

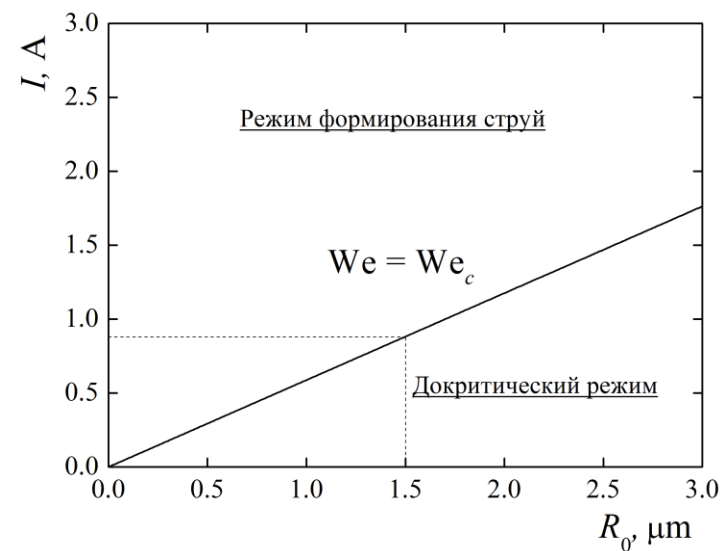
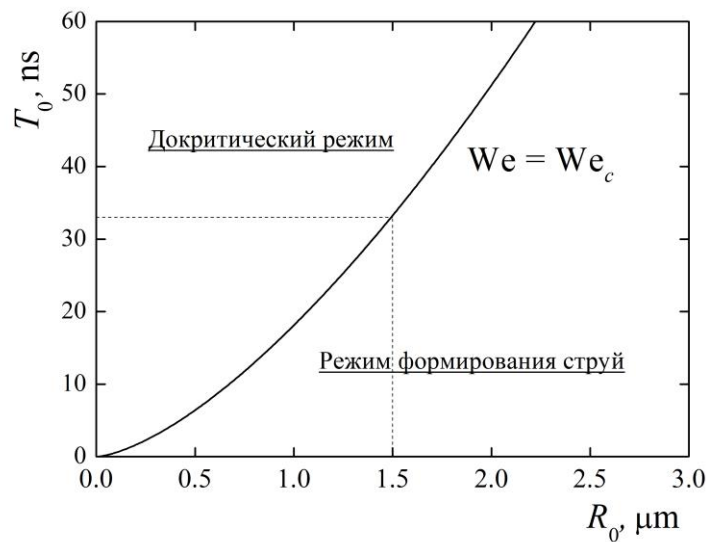
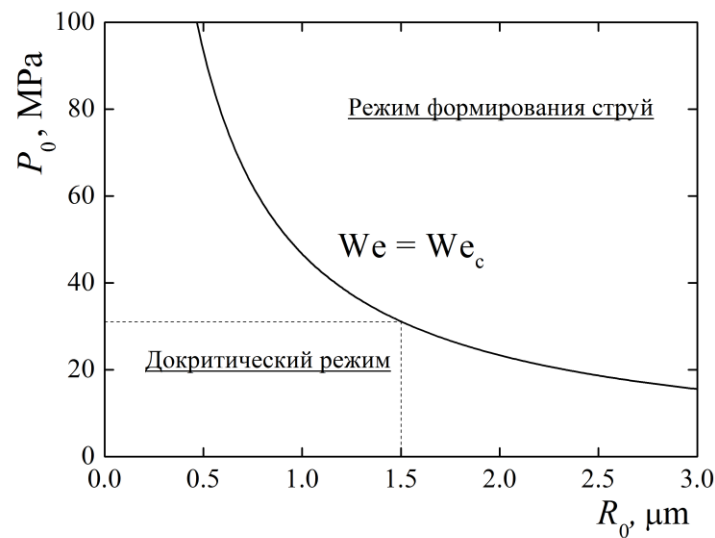
$$We = \frac{\rho U_{max}^2 R_0}{\sigma}$$

Критерий образования струй запишется в виде:

$$We > We_c, \quad We_c \approx 500$$

М.А. Гашков, Н.М. Зубарев, О.В. Зубарева, Г.А. Месяц, И.В. Уйманов. «Модель расплескивания жидкого металла в катодном пятне вакуумного дугового разряда». ЖЭТФ, том 149, вып. 4, стр. 896-908, 2016.

Критерий в других параметрах



Заключение

1. Проведён анализ поведения расплава в катодном пятне с учётом существенной трёхмерности деформаций. По результатам моделирования даны оценки для инкрементов развития неустойчивостей Рэлея-Тэйлора и Рэлея-Плато. Показано, что для медного катода при токе ячейки 3.2 А сильнее всего возрастает 11-ая мода. Также продемонстрировано, что за формирование жидкометаллических струй ответственна неустойчивость Рэлея-Плато. *1
2. Предложена качественная аналитическая модель динамики жидкости расплава в катодном пятне вакуумной дуги. В её рамках найден критерий формирования струй. В терминах числа Вебера струи формируются при превышении им значения, равного 500. *2

-
1. Принято к печати в *Письма ЖТФ*
 2. М.А. Гашков, Н.М. Зубарев, О.В. Зубарева, Г.А. Месяц, И.В. Уйманов. «Модель расплескивания жидкого металла в катодном пятне вакуумного дугового разряда». ЖЭТФ, том 149, вып. 4, стр. 896-908, 2016.

Заготовок слайда