

# ВЛИЯНИЕ ЭРОЗИИ ЭЛЕКТРОДОВ НА ТРАНСПОРТИРОВКУ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ ПО ВАКУУМНЫМ ПЕРЕДАЮЩИМ ЛИНИЯМ

## EFFECT OF ELECTRODES EROSION ON ELECTROMAGNETIC PULSES TRANSPORT ALONG VACUUM TRANSMISSION LINES

*Н. В. Егоров, Ю. В. Кудасов, П. В. Репин*

*N. V. Egorov, Yu. V. Kudasov, P. V. Repin*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» г. Саров Нижегородской обл.

Russian Federal Nuclear Center –All-Russia Scientific Research Institute of Experimental Physics

Описана модель расчета токовой эрозии стали с учетом ее неоднородной микро-структуры. Проведено двумерное магнитогидродинамическое (МГД) моделирование влияния продуктов эрозии микроструктурированных электродов на транспортировку электромагнитной энергии по участку вакуумной радиальной передающей линии. Показано, что в межэлектродное пространство линии внедряется большое количество испаренного вещества электродов, что приводит к замыканию межэлектродного промежутка. Электроды передающей линии, не имеющие микроструктуры, в тех же условиях не подвергаются токовой эрозии, наблюдается лишь их нагрев до  $\sim 500$  К.

The calculation model of the current erosion of the steel considering its heterogeneous microstructure is described. A two-dimensional magneto-hydrodynamic simulation of the effect of the erosion products of the microstructural electrodes on the electromagnetic energy transport along the section of a vacuum radial transmission line is carried out. It is shown that a large part of the evaporated substance of electrodes is embedded into the interelectrode gap of the line. It leads to a closing of an interelectrode gap. The transmission line electrodes without microstructure are not affected by the current erosion in the same conditions; their heating is observed only up to  $\sim 500$  K.

### Введение

Обеспечение электропрочности высоковольтных передающих линий является неременным условием работы электрофизических установок. В современных мощных установках линейная плотность тока на токоведущих элементах может составлять несколько сот килоампер на сантиметр и более. Высокое энерговыделение в приповерхностных слоях токоведущих элементов может сопровождаться эрозионными процессами с выносом их продуктов в межэлектродный зазор и снижением электропрочности передающих линий. В связи с этим исследование процессов эрозии токоведущих элементов при линейной плотности тока  $\sim 1$  МА/см является крайне важной задачей для обеспечения электропрочности и работоспособности мощных электрофизических установок.

Численное моделирование эрозии участков передающих линий, в которых наиболее вероятно возникновение электрического пробоя, может помочь решению указанной задачи. В работе [1] проведено двумерное МГД моделирование эрозии стальных электродов при протекании по ним тока амплитудой  $\sim 16$  МА с временем нарастания менее 1 мкс. Определено влияние на эрозию магнитной проницаемости электродов. Показано, что при линейной плотности тока на электродах до 1300 кА/см в межэлектродные зазоры не поступает заметного количества продуктов эрозии, способных ухудшить условия транспортировки электромагнитного импульса к лайнерной нагрузке.

Однако в работе [1] сталь рассматривалась как однородный материал. На самом деле, на микроскопическом уровне она представляет собой неоднородную среду: зерна и межзеренные слои [2]. Размеры зерна сильно зависят от марки стали,

ее термической и механической обработки и могут варьироваться от 1 мкм до нескольких миллиметров. Как правило, зерна состоят из феррита (близкого к чистому железу), а слои – из перлита и цементита (более насыщенных примесями и углеродом). Удельное сопротивление этих фаз сильно отличается:  $10^{-5}$  Ом·см (феррит),  $2 \cdot 10^{-5}$  Ом·см (перлит),  $14 \cdot 10^{-5}$  Ом·см (цементит). Это означает, что при протекании тока через такую неоднородную среду разогрев слоев, поперечных направлению тока, будет происходить гораздо интенсивней, чем зерен; зерна будут нагреваться от слоев. По нашим оценкам при размерах зерна значительно больших 1–3 мкм эффект неоднородного прогрева для импульсных процессов (с характерным временем импульса тока 1 мкс и менее) будет значительный. Это может привести к повышенному по сравнению с однородным материалом испарению вещества на поверхности электродов передающих линий, а значит, может сказаться на транспортировке электромагнитной энергии к нагрузке.

В данной работе описана модель расчета эрозии стали с учетом ее неоднородной микроструктуры при линейной плотности тока до 1 МА/см. На основе расчета эрозии микрофрагмента стали проведено моделирование эрозии электродов радиальной передающей линии. Двумерные МГД расчеты выполнены по программе «МЭГ-2D» [3].

### 1. Постановка задачи

Предметом исследований в данной работе является эрозия стального электрода и влияние продуктов эрозии на транспортировку токового импульса по передающей линии. При этом учитывалось, что материал стального электрода имеет внутреннюю микроструктуру. И здесь возникает чисто методический вопрос: как расчетным образом исследовать влияние неоднородной микроструктуры стали на электропрочность реальной передающей линии? Проблема заключается в сильной разномасштабности задачи: размер элемента неоднородной микроструктуры стали ~20 мкм, а характерный размер передающей линии – несколько сантиметров. Провести сквозной двумерный расчет передающей линии на сетке с размером ячейки менее 1 мкм нереально из-за слишком больших затрат машинного времени.

В данной работе эта проблема решена следующим образом. Сначала рассчитывалась эрозия стали с учетом ее микроструктуры, не привязыва-

ясь к конкретной геометрии передающей линии, а затем насчитанные потоки вещества использовались в качестве граничных условий при расчете в реальной геометрии передающей линии. Для согласованного расчета эрозии и транспортировки тока по передающей линии обе задачи решались одновременно с передачей данных из одной в другую на каждом счетном шаге.

Для упрощения расчетов полагалось, что микроструктура стали образована одинаковыми зернами в виде кубиков, прилегающих друг к другу гранями (см. рис. 1). Размер стороны зерна был выбран равным 20 мкм, а толщина межзеренного слоя – 1 мкм. Поскольку модельная микроструктура стали образована из одинаковых элементов, то для расчета эрозии в расчетную область достаточно включить один элемент вблизи поверхности. На рис. 1 расчетная область выделена прямоугольником.

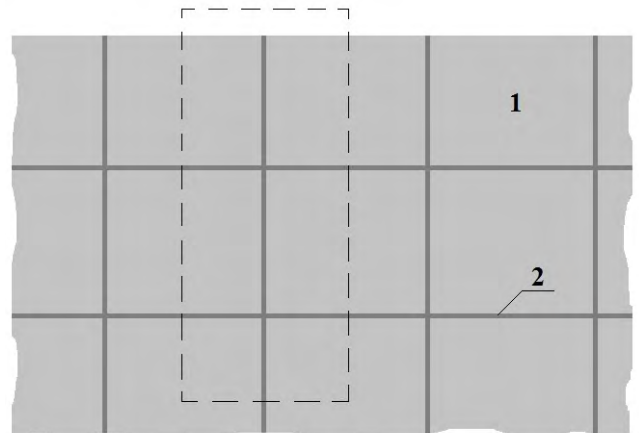


Рис. 1. Упрощенная микроструктура стали: 1 – зерно, 2 – межзеренный слой

Расчеты выполнялись с использованием двумерной МГД программы «МЭГ-2D» [3] на прямоугольной сетке, размеры ячейки которой для расчетов эрозии с учетом микроструктуры не превышали  $0,2 \times 0,2$  мкм<sup>2</sup> (определено в серии предварительных расчетов), а для расчетов передающей линии составляли  $100 \times 100$  мкм<sup>2</sup>. Как и в работе [1] уравнения состояния стали служили уравнения состояния железа по модели «РОСА» [4], а электрическая проводимость стали рассчитывалась по модели Бюргесса [5]. Физические свойства вещества зерна и межзеренного слоя в расчетах полагались одинаковыми за исключением электрической проводимости: у последнего она была в  $k_\sigma$  раз ниже.

## 2. Расчет отрезка передающей линии

Для исследования влияния продуктов эрозии на транспортировку токового импульса по передающей линии с микроструктурированными электродами проведены двумерные МГД расчеты радиальной передающей линии с межэлектродным зазором 1 см и внешним и внутренним радиусами равными 9 см и 6 см, соответственно. Такая радиальная линия входит в состав рассмотренной в работе [1] системы формирования импульса тока на основе генератора ДВМГ-240-15 и двухкаскадной системы обострения, состоящей из взрывного и радиального плазменно-потокowego размыкателей. Как и в работе [1] запитка линии производилась с внешнего радиуса импульсом тока, представленным на рис. 2. На внутреннем радиусе к линии подключена нагрузка с индуктивностью, эквивалентной нагрузке, используемой в [1]. На участке линии, ограниченном радиусами 7 см и 8 см, электроды полагались имеющими микроструктуру, описанную в предыдущем разделе. Коэффициент  $k_\sigma$  полагался равным 14. Эрозионные потоки вещества рассчитывались для одного элемента микроструктуры (см. рис. 1), домножались на количество элементов на микроструктурированном участке линии и инжектировались в межэлектродный промежуток. Расчеты проводились как без, так и с учетом распределения плотности тока по радиусу линии. В первом случае плотность тока на всем микроструктурированном участке линии полагалась равной величине, соответствующей радиусу 7,5 см. Во втором случае микроструктурированный участок линии был разделен на две части с радиальным размером 0,5 см каждая. Для верхней части плотность тока полагалась равной величине, соответствующей радиусу 7,75 см, а для нижней – 7,25 см.

Результат расчета транспортировки токового импульса по передающей линии с микроструктурированными электродами представлен на рис. 2. Ток в нагрузке получен для случая без и с учетом распределения плотности тока по радиусу линии, соответственно. Видно, что в обоих случаях спустя  $\sim 0,7$  мкс от начала импульса появляется утечка тока, которая растет со временем и к концу импульса тока достигает 6,7 МА или 38 % от входного тока. При этом расчет с разбиением микроструктурированного участка на два с разной плотностью тока дает более высокое значение утечки. В связи с этим, следует ожидать, что корректный учет распределения плотности тока по радиусу приведет к еще более существенным потерям тока при транспортировке.

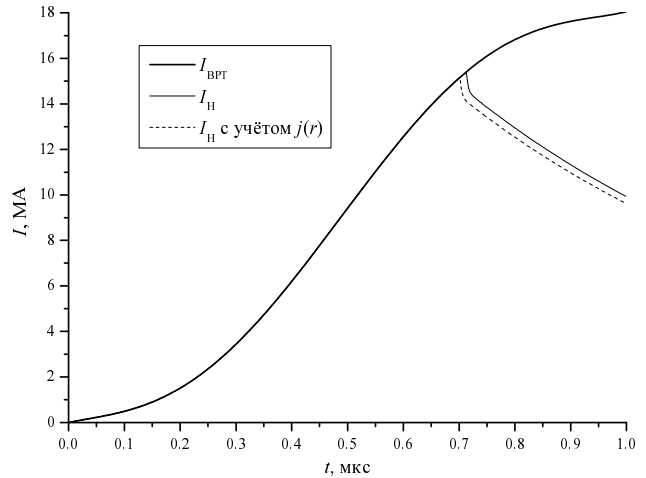


Рис. 2. Временные зависимости входного  $I_{ВРТ}$  и выходного  $I_{Н}$  токов передающей линии с микроструктурированными электродами

Динамика эрозии для случая с разбиением микроструктурированного участка на два с разной плотностью тока представлена на рис. 3 и 4 в виде распределений в межэлектродном зазоре линии субстанций вещества и плотности тока, соответственно, на несколько моментов времени. Следует отметить, что, как показано в [1], под действием того же импульса тока для однородных (неструктурированных) электродов наблюдается только нагрев их поверхностного слоя до  $\sim 500$  К, продукты эрозии в межэлектродном зазоре отсутствуют.

Из рис/ 3 видно, что через 295 нс после начала импульса тока в межэлектродный зазор начинают поступать пары межзеренного вещества, а спустя еще  $\sim 150$  нс – и пары вещества зерна. При этом за счет невысокой электропроводности паров межзеренного вещества ток не стремится течь по их поверхности (см. рисунок 4). Это приводит к тому, что сила расталкивания противоположно направленных токов в парах межзеренного вещества мала, из-за чего происходит перемыкание промежутка. Продукты эрозии частично сносятся вдоль передающей линии.

Таким образом, рассмотрение токовой эрозии электродов передающей линии с учетом неоднородной микроструктуры вещества показывает, что поступающие в межэлектродный зазор линии продукты эрозии способны значительно ухудшить условия транспортировки электромагнитной энергии.

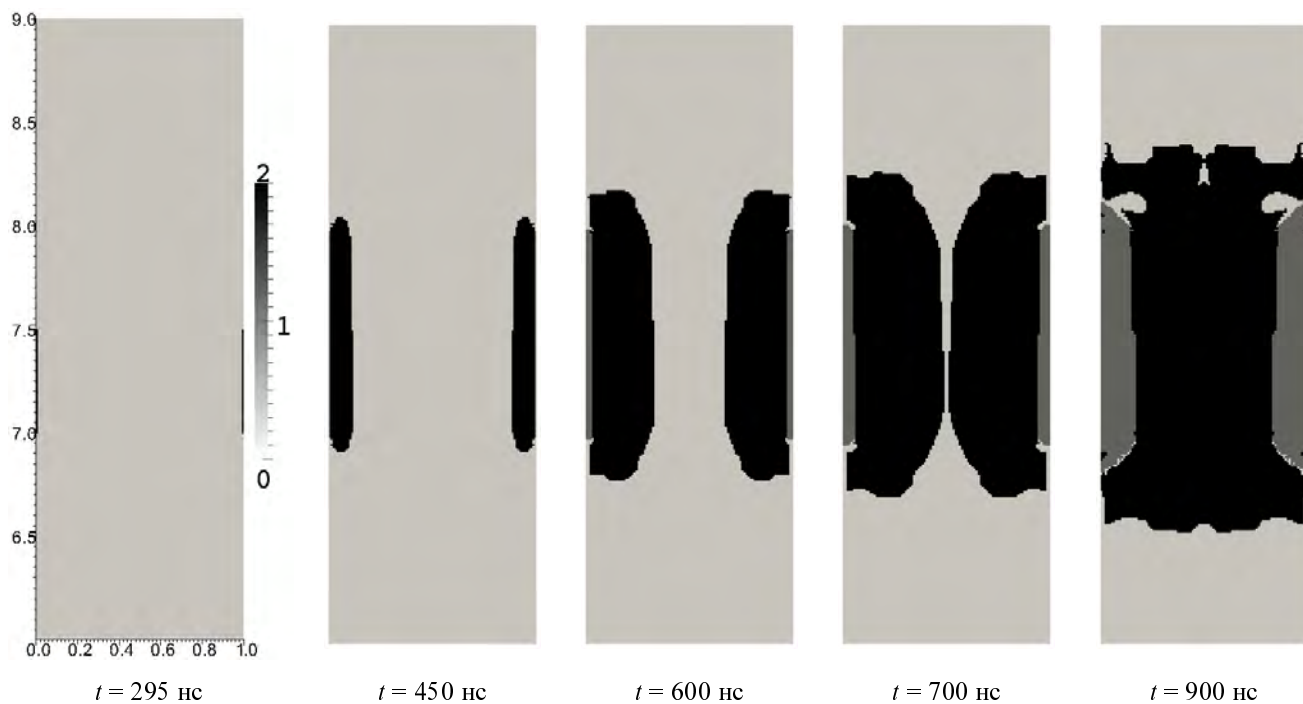


Рис. 3. Распределение субстанций в межэлектродном зазоре передающей линии в различные моменты времени: 0 – вакуум, 1 – вещество зерна, 2 – вещество межзёрненного слоя. Размеры в сантиметрах

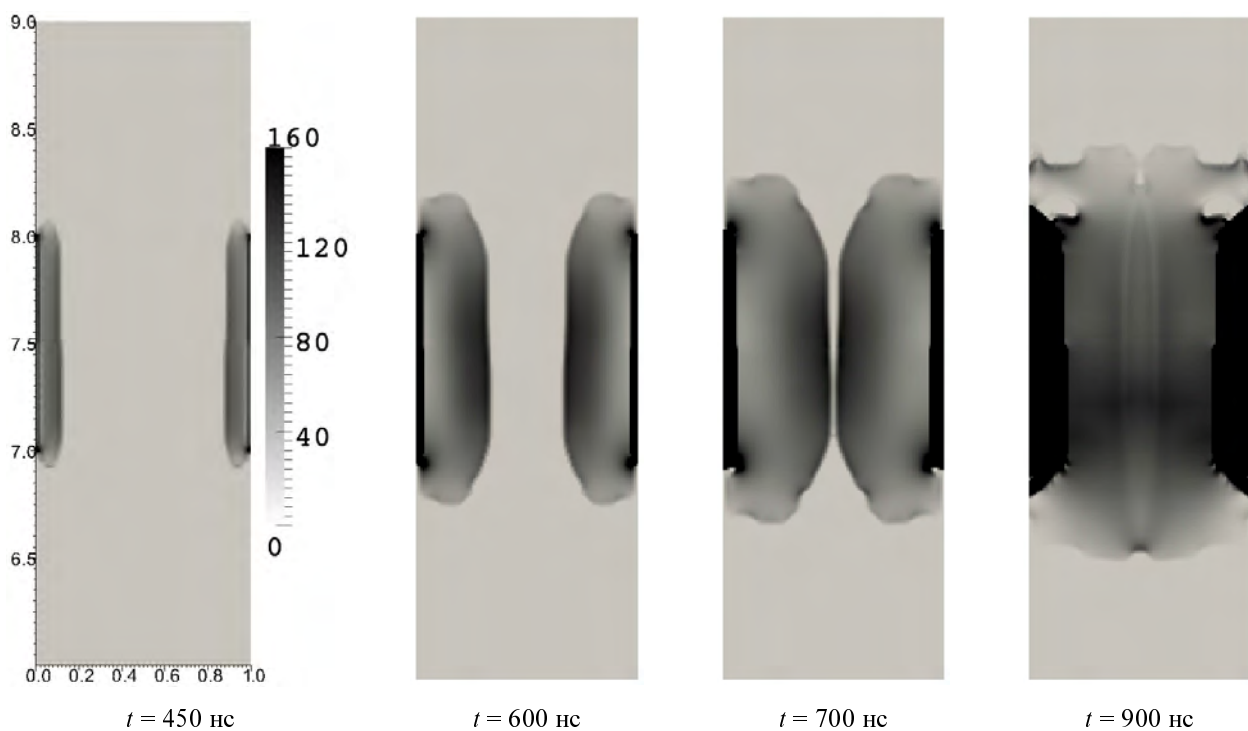


Рис. 4. Распределение плотности тока ( $\text{kA}/\text{cm}^2$ ) в межэлектродном зазоре передающей линии в различные моменты времени. Размеры в сантиметрах

## Заключение

Описана модель расчета токовой эрозии стали с учетом ее неоднородной микроструктуры. Структура стали представлялась в виде кубических зерен с размером ребра 20 мкм при толщине межзеренных слоев 1 мкм. Физические свойства вещества зерна и межзеренного слоя полагались одинаковыми, за исключением электрической проводимости: у межзеренного вещества она была хуже в 14 раз, чем у вещества зерна.

Проведено двумерное МГД моделирование влияния продуктов эрозии микроструктурированных электродов на транспортировку электромагнитной энергии по участку вакуумной радиальной передающей линии. Показано, что межэлектродное пространство линии заполняется продуктами эрозии, что приводит к замыканию межэлектродного промежутка линии и потере ~40% тока. Электроды передающей линии, не имеющие микроструктуры, в тех же условиях не подвергаются токовой эрозии, наблюдается лишь их нагрев до ~500 К.

## Список литературы

1. Егоров Н. В., Репин П. Б. Численное моделирование эрозии электродов при запитке Z-пинча

от устройства ДВМГ-240-15 с двухкаскадным обострителем тока. // Проблемы физики высоких плотностей энергии. Труды международной конференции «XVIII Харитоновские тематические научные чтения»: сборник докладов. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2017. С. 366.

2. Кекало И. Б., Самарин Б. А. Физическое металловедение прецизионных сплавов. Сплавы с особыми магнитными свойствами: Учебник для вузов. М.: Металлургия, 1989. С. 496.

3. Егоров Н. В., Барабанов В. Н., Власов Ю. В. Двумерная эйлерова методика “МЭГ-2D” и ее применение для расчета взрывного размыкателя тока. // Мощная импульсная электрофизика. Сборник докладов конференции «XIV Харитоновские тематические научные чтения». Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2013, с. 51.

4. Гордеев Д. Г., Гударенко Л. Ф., Жерноклетов М. В. и др. Полуэмпирическое уравнение состояния металлов. Уравнение состояния алюминия. // Физика горения и взрыва, 2008. Т. 44, № 2. С. 61.

5. Burgess T.J. Electrical resistivity model of metals. // In: Megagauss Technology and Pulsed Power Applications. Plenum Press, N.Y., L., 1987. P. 307.