

УДК 537.311.4

## ИЗМЕНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ ПРИ ИХ ИМПУЛЬСНОМ НАГРЕВЕ ДО ПЛАВЛЕНИЯ

© 2011 г.

*М.А. Павлейно, О.М. Павлейно, М.С. Сафонов*

Санкт-Петербургский госуниверситет,  
Научно-образовательный центр «Электрофизика», Санкт-Петербург

pavleyno@mail.ru

*Поступила в редакцию 15.06.2011*

Проведено исследование импульсного нагрева сильноточных электрических контактов в широком диапазоне температур, вплоть до начала плавления. Проанализированы данные большой серии экспериментов по прохождению через электроды импульсов тока квазигармонической формы, длительность которых сравнима с периодом промышленной частоты. В процессе компьютерной обработки экспериментальных данных получены сведения об изменении со временем площади контактных пятен, о распределении температуры и, как следствие, механических и электрических свойств материала электродов в контактной области.

*Ключевые слова:* электрический контакт, контактное пятно, контактное сопротивление, импульсный нагрев, плавление.

### Введение

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию и компьютерному моделированию импульсного нагрева сильноточных электрических контактов токами малой длительности, сравнимой с периодом промышленной частоты. Рассматриваются такие режимы работы, при которых контакты нагреваются до значительных температур, вплоть до температуры плавления. Кроме того, силы поджатия электродов выбираются достаточно большими (порядка 100 кГ). При этом значительная часть области контакта деформирована пластически. Все это приводит к тому, что при решении задачи необходимо учитывать нелинейный характер зависимости механических, электрических и тепловых свойств материала от температуры, а также нелинейное поведение материала контактов в зависимости от силы поджатия. Если учесть также нестационарность рассматриваемых процессов, то можно сделать вывод, что аналитические средства решения в данном случае являются весьма ограниченными.

С другой стороны, численное решение подобных задач с применением современных систем компьютерного моделирования физических процессов, таких, например, как ANSYS, также сопряжено с рядом трудностей. В первую очередь, это – недостаточно полная информация о механических свойствах материалов в широком диапазоне температур, вплоть до температуры плавления. Кроме того, далеко не всегда удается по-

лучить численное решение нестационарной термо-электро-механической контактной задачи при больших силах поджатия и температурах, существенно превышающих температуру размягчения материала [1].

### Описание экспериментальной установки и метода численных расчетов

Экспериментальная установка [2] представляла собой батарею конденсаторов большой емкости, в цепи разряда которой последовательно с индуктивным шунтом располагалась исследуемая система электродов. В качестве электродов выбирались пары массивных медных цилиндрических контактов типа «плоскость–конус» и «плоскость–сфера», размеры которых были гораздо больше радиуса контактного пятна. Для того, чтобы уменьшить возможность возникновения пленок на поверхности электродов, они покрывались гальваническим слоем серебра. Один электрод в каждой паре был неподвижным и имел плоское основание. Вторым электродом приводился в движение с помощью пневмоцилиндра и мог воздействовать на первый силой поджатия до 300 кГ. После поджатия электродов через них пропускаться импульс тока величиной от нескольких кА до нескольких десятков кА с частотой 50 Гц. Импульс тока представлял собой квазигармонический сигнал с аperiodической составляющей, затухающий в течение нескольких периодов. В результате каждого пропускания тока записывались

осциллограммы силы тока и напряжения, которые потом пересчитывались в зависимость контактного напряжения и сопротивления от времени, при необходимости фиксировалась сила отрыва электродов, а также до и после пропускания тока измерялось сопротивление холодных контактов. Кроме того, были сделаны микрофотографии контактных пятен и измерена шероховатость их поверхности.

Так как непосредственное измерение температуры в контактной области принципиально невозможно, то для изучения динамики нагрева электродов была применена численная схема, описанная в [3]. Она основана на подборе зависимости радиуса контактного пятна от времени, которая обеспечивает совпадение с заданной точностью зависимости от времени напряжения на электродах, полученной экспериментально и рассчитанной в модели. Модель учитывает нелинейные зависимости свойств материала от температуры, а также предполагает, что контактное пятно нефрагментировано. В настоящем исследовании исходная шероховатость поверхности была невелика, что следовало из рассмотрения профилеграмм. Это связано с качеством изготовления самих медных электродов, а также с тем, что их поверхность гальванически обрабатывалась. Кроме того, мы можем говорить о незначительной степени шероховатости поверхности, имея в виду большие усилия поджатия, которые реализовывались в эксперименте. В таком случае при численном моделировании можно считать контактные пятна нефрагментированными. Этот вывод был подтвержден многократным сравнением значения радиуса контактного пятна, полученного из микрофотографий и рассчитанного из значения холодного сопротивления контакта в предположении нефрагментированного пятна.

### Обсуждение полученных результатов

При прохождении через электроды импульсов тока миллисекундной длительности область нагрева локализована в малой окрестности контактного пятна. Ее размер составляет 1-2 радиуса контактного пятна. При удалении от области контакта вглубь электрода температура быстро падает до температуры окружающей среды. Сама же область контактного пятна прогрета сильно неравномерно.

Температура принимает максимальное значение на границе контактного пятна и падает к его центру. Неравномерность нагрева увеличивается с увеличением величины тока, и при достижении температуры плавления она может достигать несколь-

ко сотен градусов.

Результаты численных расчетов показали, что до достижения температуры размягчения материала радиус контактного пятна остается практически постоянным, затем несколько увеличивается. И к моменту достижения температуры плавления электродов это увеличение составляет 10–20% от начального радиуса. Тем не менее, учитывать его необходимо, иначе ошибка в определении температуры, как показали проведенные расчеты, может превысить 500°.

Построены зависимости радиуса контактного пятна от времени. Результаты подтверждены соответствующими оценками, сделанными на основе микрофотографий контактов и на основе измерения сопротивления контактов до и после пропускания тока.

Подробно исследован процесс размягчения контактной области. Определены скорости движения фронта размягчения материала электродов от края контактного пятна к его центру, а также наружу и вглубь электродов. Показано, что фронт размягчения движется к центру пятна в несколько раз быстрее, чем в других направлениях. Рассчитаны градиенты механических свойств материала электродов, возникающие при импульсном нагреве.

Таким же образом ведут себя и изотермы с большим значением температуры, в том числе и близкие по величине к температуре плавления. Можно предположить, что при достижении на краю контактного пятна температуры плавления область расплавленной меди быстрее распространяется к центру контактного пятна, чем наружу и вглубь электрода. При этом радиус контактного пятна существенно не увеличивается. Только после того, как вся поверхность контактного пятна оказывается расплавленной, можно ожидать более интенсивного увеличения радиуса контактного пятна со временем.

Эта гипотеза была подтверждена соответствующими экспериментальными исследованиями. Заметим, что при малых силах поджатия, когда контактное пятно сильно фрагментировано, динамика плавления может оказаться отличной от описанной выше.

### Список литературы

1. Борисенко П.А., Павлейно О.М., Павлейно М.А., Статуя А.А. Методы численного решения нелинейных нестационарных термо-электро-механических контактных задач // Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей: Сб. трудов IX Международ. научн. конф. Санкт-Петербург. 2009. С. 287–291.
2. Chaly A., Dmitriev V., Pavleyno M., Pavleyno O.

Experimental research and computer simulation process of pulse heating high current contacts of vacuum interrupters // Intern. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Braunschweig, Germany. 2010. V. 2. P. 418–423.

3. Павлейно О.М., Павлов В.А., Павлейно М.А. // Влияние расплывания контактного пятна на процесс импульсного нагрева электродов. Электронная обработка материалов. Молдавия. Кишинев. 2011. (В печати).

#### **CHANGES IN MECHANICAL PROPERTIES OF ELECTRICAL CONTACTS DURING PULSED HEATING UP TO MELTING**

*M.A. Pavleino, O.M. Pavleino, M.S. Safonov*

Pulsed heating of high-current electrical contacts is studied in a wide temperature range up to the start of melting. The analysis involved the data of a large batch of experiments on current pulses of quasi-harmonic shape and duration, comparable with power frequency period, passing through electrodes. Numerical data processing yielded information on the variation of contact spot area with time, on the temperature distribution and, hence, the distribution of mechanical and electrical properties of the electrode material in the contact region.

*Keywords:* electrical contact, contact spot, contact resistance, pulsed heating, melting.