

## ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ ИМПУЛЬСНОГО НАГРЕВА АЛЮМИНИЕВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ С МЕДНЫМ ПОКРЫТИЕМ

Павлейно О.М.<sup>1</sup>, Сафонов М.С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, физический факультет (198504, Россия г. Санкт-Петербург, Петергоф, ул. Ульяновская, д. 3), e-mail: pavleyno@mail.ru

В последние годы в силовой электроэнергетике наблюдается тенденция замены медных элементов токоведущих систем на алюминиевые. Это связано, в первую очередь, с опережающим ростом цены на медь. При такой замене часто используются не чисто алюминиевые проводники, а алюминиевые детали с нанесенным на их поверхность медным покрытием небольшой толщины. Это позволяет проще решать ряд эксплуатационных и технологических проблем, например, дает возможность нанесения гальванических покрытий стандартными способами. В данной работе проведено численное моделирование нагрева электрических контактов протекающим импульсным током в широком диапазоне температуры. Выполнено исследование влияния толщины медного слоя на процесс импульсного нагрева электродов со слоистой структурой. Это влияние связано со значительным различием свойств меди и алюминия, определяющих процесс нестационарного нагрева: теплопроводности, теплоемкости, плотности, а также температуры плавления. Для каждой длительности импульса тока существует пороговое значение толщины медного покрытия, которое разграничивает два разных типа нагрева, отличающихся по локализации места начала плавления контактов: при толщине меньше пороговой плавление начинается на границе раздела медь-алюминий, при толщине медного слоя больше критической плавление происходит на поверхности контактного пятна. Проведено сравнение динамики нагрева чисто медных и слоистых контактов.

Ключевые слова: электрический контакт, импульсный нагрев, плавление.

## NUMERICAL CALCULATION OF PULSE HEATING OF ALUMINUM ELECTRICAL CONTACT WITH COPPER COATING

Pavleino O.M.<sup>1</sup>, Safonov M.S.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>St. Petersburg State University, Faculty of Physics, ul. Ul'yanovskaya, 3, St. Petersburg, Peterhof, 198504, Russia, e-mail: pavleyno@mail.ru

Recently, the electric power industry witnesses the trend of replacing copper conductor systems with aluminum ones. The reason for that is, primarily, the rise of copper prices. Such replacement often uses aluminum parts with copper coating of small thickness rather than pure aluminum conductors. This makes it easier to solve a number of operational and technological problems, e. g., allows plating a coating in a standard manner. The present work reports of numerical simulations of the heating of electrical contacts by a running pulse current in a wide temperature range. The effect of the copper layer thickness on the process of pulse heating of electrodes with layered structure is studied. This is associated with significant differences in the properties of copper and aluminum, which define the process of non-stationary heating: thermal conductivity, heat capacity, density and melting point. For each current pulse duration, there exists a threshold value of the copper coating thickness that delimits two different types of heating, which differ in the localization of sites where contact melting starts. When the thickness is less than the threshold value, the melting begins at the copper-aluminum interface; when the copper layer is thicker than the threshold value, the melting occurs on the surface of contact spots. The dynamics of heating is compared for layered and pure copper contacts.

Keywords: electric contact, pulse heating, melting.

В настоящее время разработчики высоковольтных силовых электрических аппаратов и других устройств силовой электроэнергетики стремятся там, где это возможно, заменять медь как основной материал элементов токоведущих систем на другие, более дешевые материалы, в частности на алюминий и его сплавы. Это вызвано интенсивным опережающим ростом цен на медь на мировых рынках: за последние 10 лет цена на медь выросла примерно в 5 раз. Основным препятствием на пути такой замены является меньшая электро-

проводность алюминия по сравнению с медью, что приводит к дополнительным тепловым потерям и ухудшению теплового режима аппаратов при протекании номинальных токов.

Возникают и другие проблемы. Например, значительное снижение стойкости контактных соединений к ударным токам короткого замыкания из-за довольно низкой температуры плавления алюминия. Эту трудность можно отчасти обойти, применяя контакт-детали со слоистой структурой. Основным материалом является алюминий, на поверхность которого тем или иным способом наносится небольшой по толщине слой меди. Основными способами создания медного покрытия являются напыление и плакирование [2]. При этом получается разное по качеству сцепление нанесенного слоя с подложкой и, следовательно, покрытия разного качества. В зависимости от технологии нанесения меди и условий эксплуатации контакта ее толщина может варьироваться в широких пределах – от десятков микрон до единиц миллиметров. Влияние свойств покрытия, в частности степени шероховатости его поверхности, а также качества сцепления слоя меди с алюминиевой подложкой на стойкость контактов к протекающему через них току будет рассматриваться нами в следующих работах с привлечением методов экспериментального исследования. Здесь же мы проведем оценку влияния толщины покрытия на динамику нагрева контактов путем проведения численных расчетов.

**Исследуемая модель и результаты численных расчетов.** В работе проводится численное моделирование процесса импульсного нагрева слоистых контактов, в качестве которых используются два цилиндрических электрода, соединенные одним контактным пятном круглой формы, расположенным на оси симметрии. Радиус контактного пятна выбран равным 0,5 мм. Такой размер характерен для сильноточных контактов. При этом само пятно считается полностью проводящим. Влияние фрагментации на параметры сильноточных электрических контактов было оценено нами в [4]. Исследуемые контакты схематично изображены на рис. 1, где показано их сечение, проходящее через ось симметрии, линии тока и равного потенциала. Численное решение задачи строится в программном комплексе ANSYS.

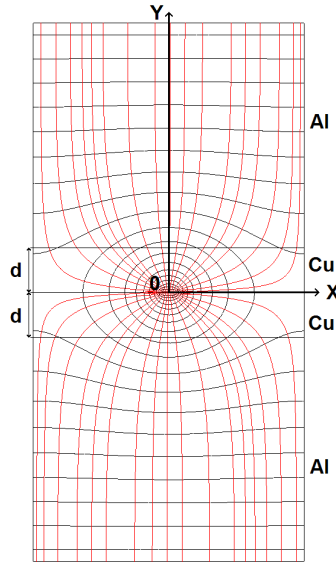


Рис. 1. Цилиндрические контакты со слоистой структурой.

Процесс прохождения тока через контакты без учета термоэлектрических эффектов описывается следующей системой уравнений:

$$\nabla\left(\frac{1}{\rho}\nabla\varphi\right)=0 \quad (1)$$

$$\vec{E}=-\nabla\varphi \quad (2)$$

$$\vec{j}=\frac{1}{\rho}\vec{E} \quad (3)$$

$$\gamma c_p \frac{\partial T}{\partial t}-\nabla(\kappa\nabla T)=\rho j^2 \quad (4)$$

где  $T$  – температура,  $j$  – плотность электрического тока,  $\varphi$  – электрический потенциал,  $E$  – напряженность электрического поля,  $\rho$  – удельное сопротивление материала,  $\kappa$  – теплопроводность,  $\gamma$  – плотность,  $c_p$  – теплоемкость. Уравнения (1) – (3) связывают электрический потенциал, напряженность электрического поля и плотность тока, уравнение (4) – это нестационарное уравнение теплопроводности с объемным источником тепловыделения. К настоящему времени нет единого мнения о том, нужно ли учитывать термоэлектрические токи при нагреве сильноточных электрических контактов [1; 5]. Однако для случая, когда контактирующие поверхности выполнены из меди, их наличием можно пренебречь на фоне токов проводимости [3].

В качестве токового воздействия зададим импульс прямоугольной формы длительностью 10 мс. Амплитуду будем выбирать таким образом, чтобы максимальная температура достигала температуры плавления. Выбор длительности продиктован тем, что при прохождении тока короткого замыкания плавление происходит в течение первого полупериода (с учетом апериодической составляющей тока). Получающиеся данные о нагреве при таком

токовом воздействии позволят сделать некоторые выводы о стойкости контактов со слоистой структурой к ударному току. В силу малой длительности нагрева на всех внешних поверхностях задавалось граничное условие, соответствующее отсутствию теплообмена с окружающей средой. На границах раздела *Cu-Al* задавались непрерывными потенциал и температура, а также значения плотности электрического тока и теплового потока.

Приведем распределение температуры в окрестности контактного пятна в предельном случае бесконечно толстого слоя меди  $d = \infty$  (случай чисто медных контактов), рис. 2. Максимум температуры расположен на краю пятна. Фронт тепла за время действия импульса тока распространяется на расстояние  $d_\phi$  порядка нескольких радиусов контактного пятна.

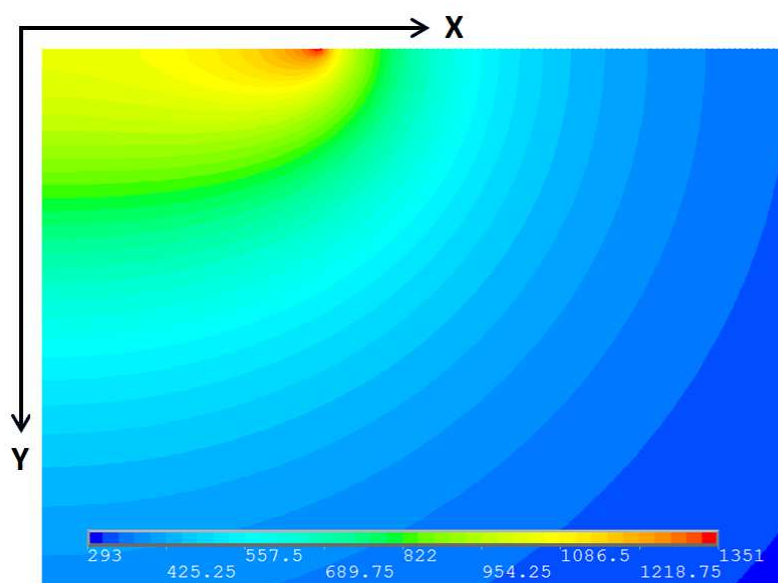


Рис. 2. Распределение температуры в окрестности контактного пятна при  $t = 10 \text{ мс}$ .

В случае слоистых электродов при толщине медного слоя меньше  $d_\phi$  произойдет искажение теплового поля в силу различия свойств материала меди и алюминия (табл. 1).

Таблица 1

Свойства *Cu* и *Al* при НКУ

|                            | <i>Cu</i> | <i>Al</i> |
|----------------------------|-----------|-----------|
| $\gamma, \text{ кг/м}^3$   | 8890      | 2700      |
| $\kappa, \text{ Вт/(м*К)}$ | 385       | 236       |
| $c_p, \text{ Дж/(кг*К)}$   | 349       | 900       |
| $T_{пл}, \text{ К}$        | 1356      | 933       |

Проследим за температурой на границе раздела меди и алюминия, уменьшая толщину медного слоя начиная со значения  $d = 1 \text{ мм}$ , и подбирая ток  $I = I_{nl}(d)$  для каждой толщины

таким, чтобы достигалась температура плавления меди. При этом можно определить то пороговое значение толщины медного покрытия  $d_n$ , которое разделяет два разных типа плавления. При  $d > d_n$  плавление начинается в области контактного пятна (плавится медь), в обратном случае – на границе раздела (плавится алюминий). На рис. 3 приведены распределения температуры вдоль оси  $O_1X_1$ , проходящей по границе раздела  $Cu-Al$  при разной толщине медного слоя. Штрихпунктирной линией обозначена величина температуры плавления алюминия. Из данной серии графиков можно определить значение предельной толщины слоя меди. Для длительности нагрева  $\tau = 10$  мс оно составляет  $d_n = 0,2$  мм.

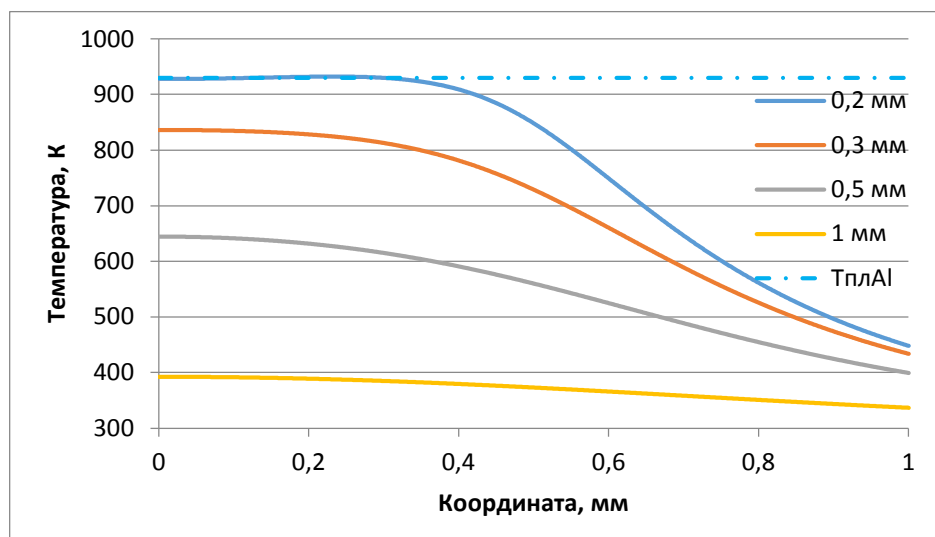


Рис. 3. Распределение температуры на границе раздела  $Cu-Al$  при  $t = 10$  мс .

Определим понятие предельно допустимого импульсного тока для слоистых контактов. Это такое значение тока, при котором к моменту окончания его действия достигается либо температура плавления меди в области контактного пятна (соответствующее значение тока обозначено  $I_{nl}^{Cu}$ ), либо температура плавления алюминия на границе раздела двух металлов (ток обозначен  $I_{nl}^{Al}$ ):

$$I_{\max} = \begin{cases} I_{nl}^{Cu}, & d > d_n \\ I_{nl}^{Al}, & d < d_n \end{cases}$$

Тогда при выполнении условия  $I < I_{\max}$  плавления контактов не произойдет.

Зависимость  $I_{\max}$  от толщины медного слоя и уровень тока  $I_{nl}^{Cu}$ , который приводит к плавлению в случае чисто медных электродов, представлены на рис. 4. Область, расположенная под кривой, соответствует таким значениям импульсного тока и толщины покрытия, при которых не происходит плавления контактов ни в области контактного пятна, ни на границе раздела металлов. Можно предположить, что при выходе за пределы этой области ра-

ботоспособность контактов будет нарушена. Такое предположение основано на результатах экспериментальных исследований по прохождению ударных токов через сильноточные контакты [6].

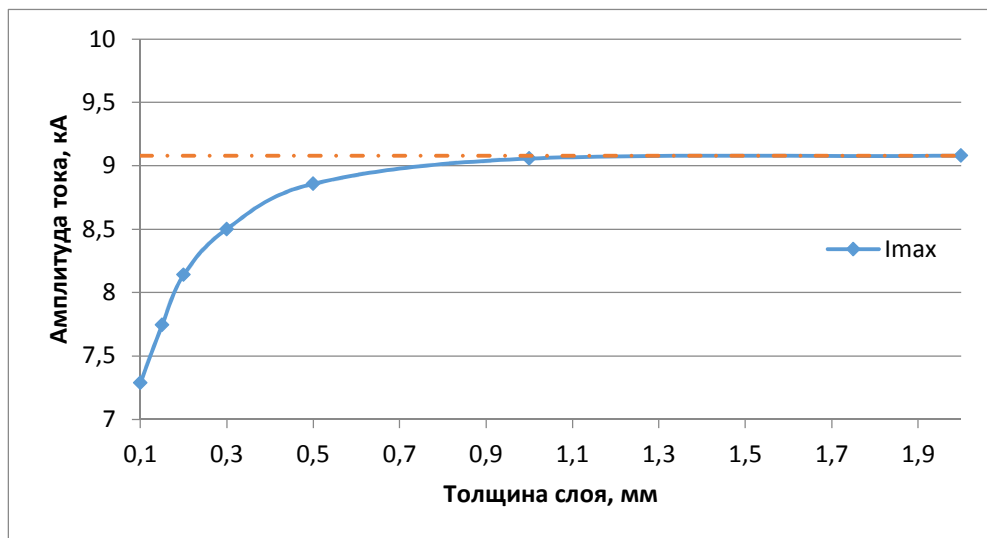


Рис. 4. Зависимость предельно допустимого тока от толщины покрытия.

Толщина медного покрытия существенно влияет на динамику нагрева контактной области, что подтверждается семейством кривых, описывающих изменение во времени максимальной температуры контактов для различных значений параметра  $d$  (рис. 5).

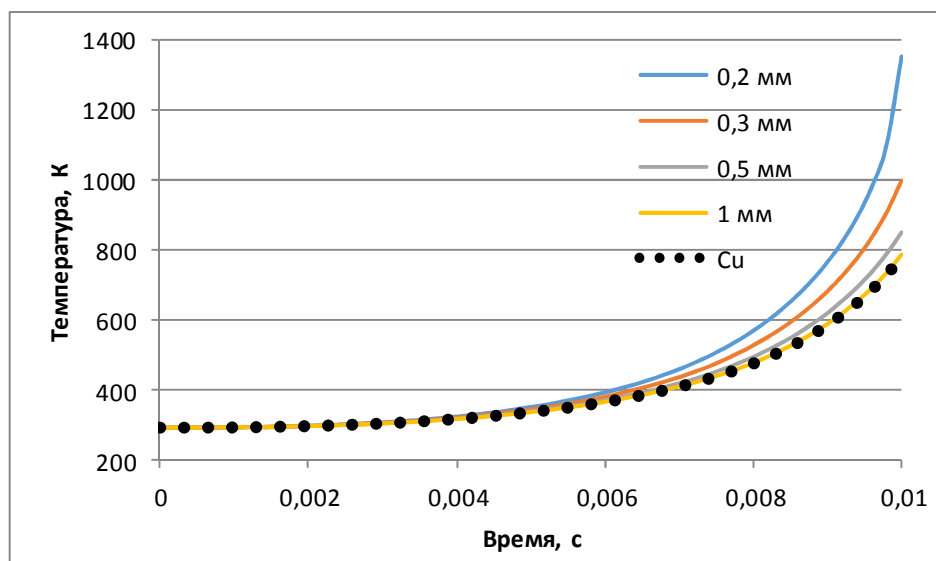


Рис. 5. Зависимость максимальной температуры контактов от времени при различных значениях толщины покрытия.

### Заключение

Проведено исследование импульсного нагрева протекающим током алюминиевых контактов с медным покрытием в широком диапазоне температур, вплоть до начала плавления. Показано, что в зависимости от толщины медного слоя плавление может начинаться либо в области контактного пятна, либо на границе раздела двух металлов. Введено понятие пре-

дельно допустимого тока, при котором плавление контактов еще не происходит, получена его зависимость от толщины покрытия. Построены кривые нагрева слоистых контактов, определяющие изменение во времени максимальной температуры в окрестности контактного пятна. При толщине покрытия, равной диаметру контактного пятна, величина предельного тока практически не отличается от соответствующей величины для чисто медных контактов при рассмотренных токовых воздействиях. Приведенные в работе зависимости позволяют оценить уменьшение величины предельно допустимого тока и роста максимальной температуры контактов при использовании покрытий меньшей толщины.

### Список литературы

1. Ким Е.И., Омельченко В.Т., Харин С.Н. Математические модели тепловых процессов в электрических контактах. - Алма-Ата : Наука, 1977.
2. Король В.К., Гильденгорн М.С. Основы технологии производства многослойных металлов. - М. : Металлургия, 1970. - С. 236.
3. Меркушев А.Г., Павлейно М.А., Павлейно О.М., Павлов В.А. О влиянии эффекта Томсона на импульсный нагрев сильноточных электрических контактов // ЖТФ. - 2014. – Т. 84, вып. 9. - С. 149-152.
4. Павлейно О.М. О влиянии фрагментации контактных пятен на сопротивление сильноточных электрических контактов // Современные проблемы науки и образования. - 2014. - № 2.
5. Самойлов В.В. Аналитическое и численное моделирование процессов электро- и теплопереноса в многоточечных электрических контактах : дис. ... канд. ф.-м. наук: 05.13.18. - Ульяновск, 2004.
6. Chalyi A.M., Dmitriev V.A., Pavleino M.A., Pavleino O.M. Heating of high current electric contacts under short-circuit shock current // Surface Engineering and Applied Electrochemistry, 2013. – Vol. 49, No. 5. - P. 433–439. - ISSN 1068-3755.

### Рецензенты:

Ключарев А.Н., д.ф.-м.н, профессор, кафедра оптики, физический факультет, Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург.

Бисярин М.А., д.ф.-м.н, профессор, Санкт-Петербургский государственный университет, физический факультет, кафедра радиофизики, г. Санкт-Петербург.