

ВЛИЯНИЕ РАСПЛЫВАНИЯ КОНТАКТНОГО ПЯТНА НА ПРОЦЕСС ИМПУЛЬСНОГО НАГРЕВА ЭЛЕКТРОДОВ

О.М. Павлейно, В.А. Павлов, М.А. Павлейно

*Санкт-Петербургский государственный университет,
Научно-образовательный центр "Электрофизика" физического факультета,
ул. Ульяновская, д.3, г. Санкт-Петербург, Петродворец, 198504, Россия,
pavleyno@mail.ru*

Введение

Процессам, сопровождающим протекание тока через электрические контакты, посвящено большое число работ, начиная с основополагающей работы Р. Хольма [1] и заканчивая современными исследованиями, достаточно полный обзор, которых сделан, например, в [2]. Несмотря на это, ряд вопросов изучен недостаточно полно. Это касается в первую очередь нестационарных режимов нагрева контактов до значительных температур, близких к температуре плавления, особенно если речь идет о сильноточных контактах, когда токи составляют десятки килоампер. Это связано в том числе и со сложностью проведения экспериментов в области больших токов [3]. Данная работа посвящена компьютерному моделированию именно таких режимов нагрева.

В наиболее полной постановке задача о нагреве электрических контактов протекающим током должна быть сформулирована как совместная термоэлектромеханическая контактная задача. Попытки ее решения неоднократно предпринимались [5–8]. Однако получить достоверные результаты удается не всегда. Это связано в первую очередь с тем, что механические свойства материалов контактов в широком диапазоне температур, вплоть до температуры плавления, с достаточной степенью точности зачастую оказываются неизвестны, что может привести к погрешностям в определении размеров контактных пятен, сильно изменяющих картину нагрева электродов [3].

Нами предложен способ численных расчетов, основанный на экспериментально определяемой зависимости контактного напряжения от времени, который позволяет рассчитать нагрев электродов без решения механической части задачи. В работе проведен анализ динамики нагрева контактной области, показана сильная локализация области выделения мощности и, как следствие, неоднородность распределения температуры в контактном пятне. Выявлено влияние размягчения материала и вызванного им расплывания контактного пятна на нагрев электродов.

Методика проведения численных расчетов

Численные расчеты были основаны на данных, полученных в ходе проведения серии экспериментов по пропусканию импульсных токов через контакты простейших форм, при которых происходит их нагрев вплоть до плавления. Для объяснения природы явлений, сопровождающих нагрев контактов протекающим током, форма электродов выбиралась такой, чтобы при поджатии образовывалось одно контактное пятно круглой формы. Сила поджатия электродов должна быть достаточно большой для того, чтобы контактное пятно можно было считать не фрагментированным. В рассматриваемом ниже случае она составила 250 кГ. Поджатие электродов осуществлялось с помощью пневмоцилиндра, сила поджатия измерялась датчиком давления. В результате каждого опыта получены осциллограммы тока и напряжения на образце, величина сопротивления образца до и после пропускания тока, величина силы отрыва контактов и микрофотография области контакта. Подробнее детали проведения эксперимента описаны в [3].

Алгоритм проведения численных расчетов был следующим. При моделировании мы предполагали, что ток проходит по одному сплошному контактному пятну круглой формы, расположенному на оси симметрии электродов. Процесс нагрева электродов протекающим током описывается системой уравнений, включающей в себя нестационарное уравнение теплопроводности и уравнение неразрывности для плотности тока. Мы полагали, что форма контактного пятна остается неизменной, а его радиус изменяется в процессе нагрева. Решалась нестационарная задача, при этом в каждый момент времени радиус контактного пятна подбирался таким, чтобы значение напряжения, полученное численно, с достаточной степенью точности совпадало с экспериментальным. Начальный радиус контактного пятна определялся из величины сопротивления контактов, измеренного до пропускания импульса тока через электроды, с учетом близости границ электродов к пятну [4]. В результате решения мы получали распределения температуры, тепловых потоков, плотности тока, выделяемой мощности

и других величин в различные моменты времени. Расчеты проводились до тех пор, пока температура контакта не достигала своего наибольшего значения.

Проведенные ниже численные расчеты описывают процессы, сопровождающие прохождение тока синусоидальной формы с аperiodической составляющей через два медных цилиндрических электрода (рис. 1,а) высотой 180 мм и диаметром 20 мм. Основание одного из них скошено с углом наклона 3° . Максимальное значение тока в первом полупериоде равно 30,2 кА. Соответствующая осциллограмма тока приведена на рис. 1,б. На рис. 1,в представлена микрофотография области контактного пятна после разведения контактов. Радиус контактного пятна в приведенном случае составил приблизительно 0,75 мм.

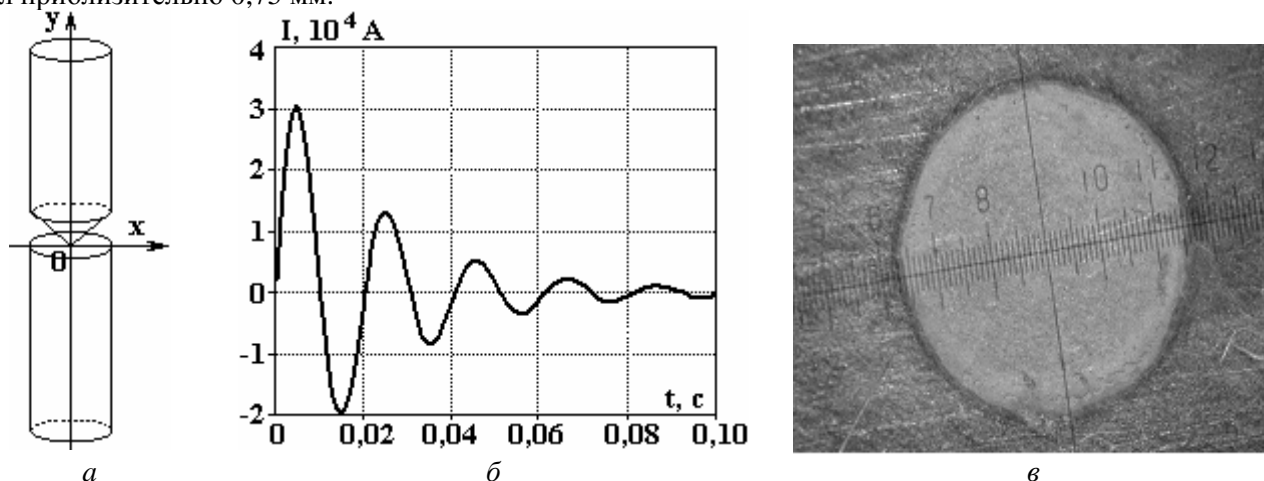


Рис. 1. Схематическое изображение электродов (а), осциллограмма тока (б), микрофотография контактного пятна (в)

Результаты численных расчетов

На рис. 2,а и б приведены полученные в результате численных расчетов зависимости от времени радиуса контактного пятна и максимальной температуры контактной области. Радиус контактного пятна сохраняет практически постоянное значение до температуры $T \approx 600$ К, а затем начинает увеличиваться. Это увеличение связано с размягчением материала. Приведенная на рис. 2,в зависимость предела текучести меди от температуры имеет особенность при том же значении последней.

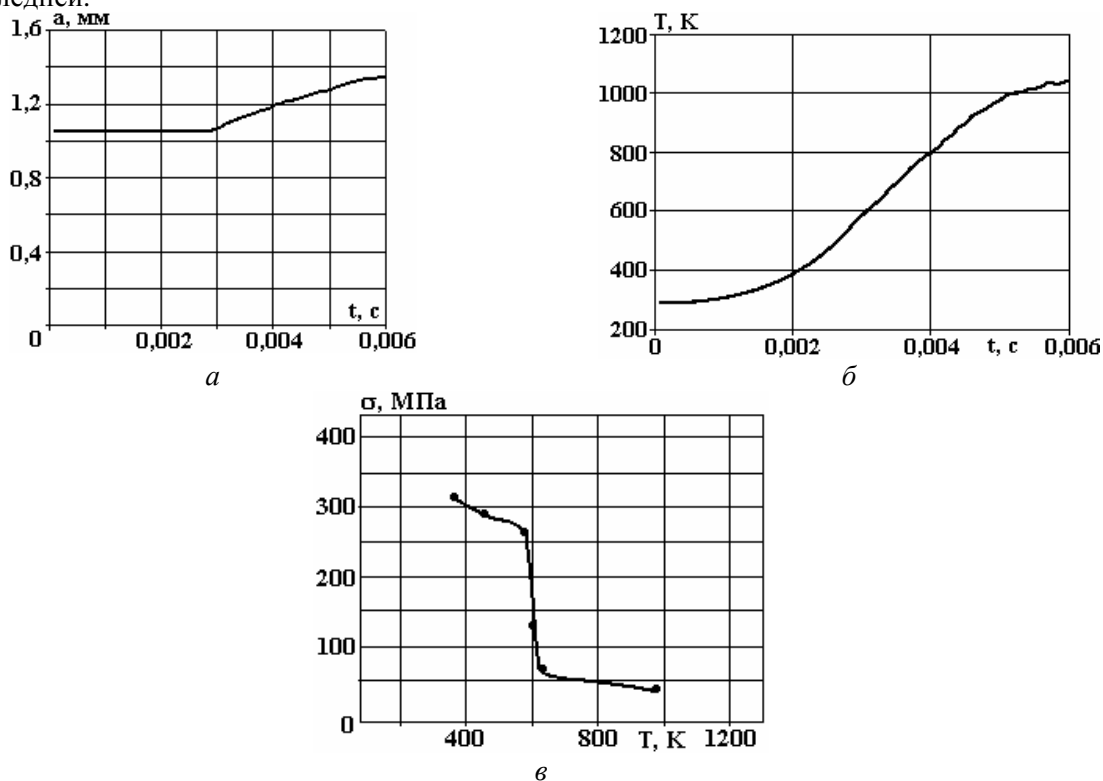


Рис. 2. Зависимость радиуса контактного пятна от времени (а), зависимость максимальной температуры от времени (б), зависимость предела текучести меди от температуры (в)

Возникает вопрос: насколько существенно влияет расплывание контактного пятна на нагрев электродов и можно ли при проведении численных расчетов его не учитывать, полагая радиус пятна неизменным.

Сравним результаты решения задачи о нагреве электродов одним и тем же током (рис. 1,б) с использованием двух моделей. В первой будем считать радиус контактного пятна постоянным, равным начальному радиусу $a_0=1,05$ мм, а во второй учтем расплывание пятна. Посмотрим, как изменяется со временем максимальная температура электродов (рис. 3). В приближении постоянного радиуса температура плавления достигается в момент времени 4,15 мс. К этому времени при учете расплывания пятна мы получаем значение температуры на 500 градусов меньше. Заметим, что в это время радиус пятна увеличился всего на 15%. Максимальная же температура в области контакта во втором случае достигается к моменту времени 6 мс и составляет 1050К, то есть данный ток не вызывает плавления электродов.

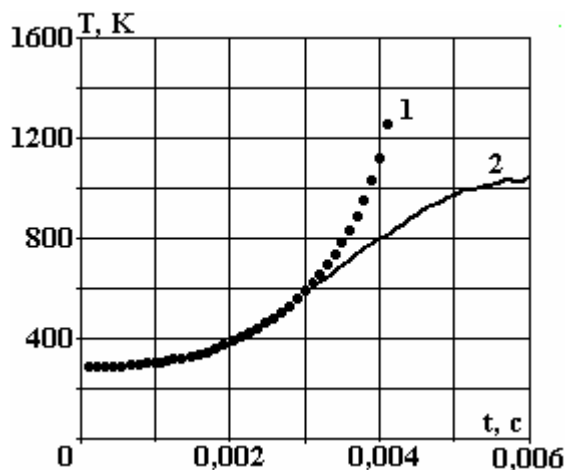


Рис. 3. Зависимость максимальной температуры от времени в области контакта. Сплошная линия соответствует случаю постоянного радиуса контактного пятна, пунктирная – случаю переменного. 1 – $a = const$; 2 – $a = a(t)$

Таким образом, расплывание контактного пятна, вызванное размягчением материала, приводит к существенному изменению температуры. Проанализируем, почему это происходит.

Приближение постоянного радиуса контактного пятна

Рассмотрим сначала процесс нагрева электродов при неизменном радиусе пятна. Контурный график распределения температуры в области контактного пятна при $t = 4,15$ мс, когда максимальная температура приблизилась к температуре плавления, представлен для одного из электродов на рис. 4.

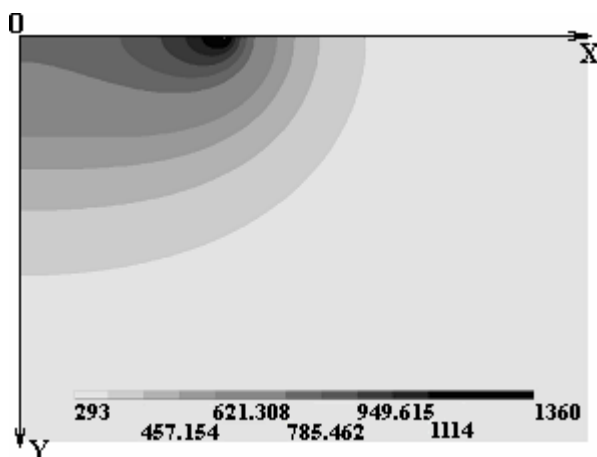


Рис. 4. Контурный график распределения температуры в области контактного пятна при $t = 4,15$ мс. Случай постоянного радиуса контактного пятна

Начало координат соответствует центру контактного пятна, ось X проходит по поверхности пятна, а ось Y перпендикулярна ему и совпадает с осью симметрии электродов. Нагретая область имеет размер около двух радиусов контактного пятна. Максимальная температура достигается на краю контакта.

Динамику нагрева иллюстрируют рис. 5, а и б, на которых изображены графики распределения температуры вдоль оси ОХ и ОУ в разные моменты времени.

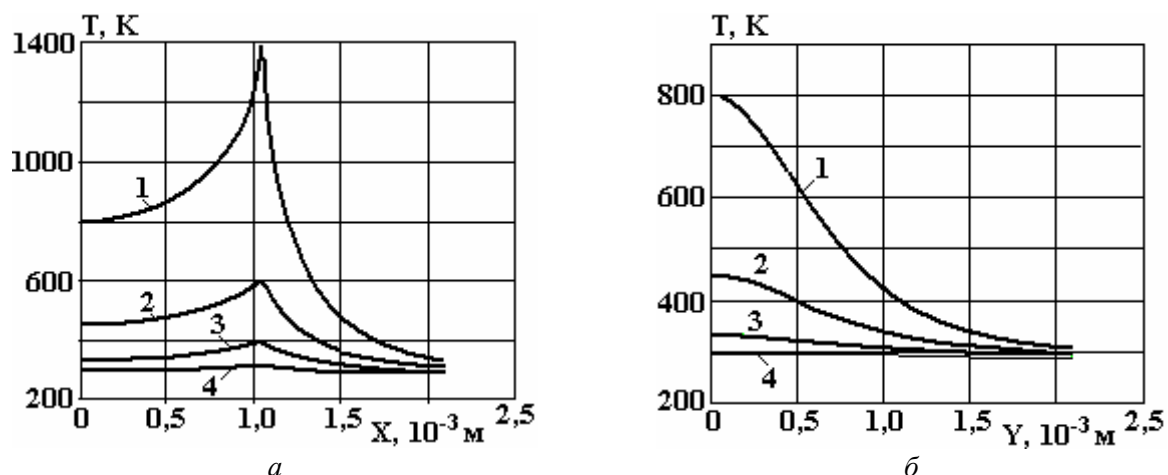


Рис. 5. Графики распределения температуры в разные моменты времени. Случай постоянного радиуса контактного пятна. t , мс: 1 – 4,15; 2 – 3; 3 – 2; 4 – 1

Вдоль оси ОХ температура изменяется немонотонно. Она максимальна на краю контактного пятна и уменьшается к его центру и к поверхности электрода. При удалении от центра контактного пятна вдоль оси симметрии температура уменьшается монотонно. Контакт прогревается неравномерно. С течением времени разность температур в центре контактного пятна и на его краю увеличивается и к моменту начала плавления превышает 500 К.

Это объясняется тем, что плотность тока и, следовательно, выделяющаяся мощность распределены по контактному пятну сильно неравномерно (рис. 6). Максимум плотности тока располагается на краю контактного пятна, и его значение приблизительно в 7 раз больше, чем в центре. Аналогично распределена мощность, выделяемая в процессе прохождения импульса тока через электроды. Мощность выделяется в основном в узком кольце в окрестности края контактного пятна.

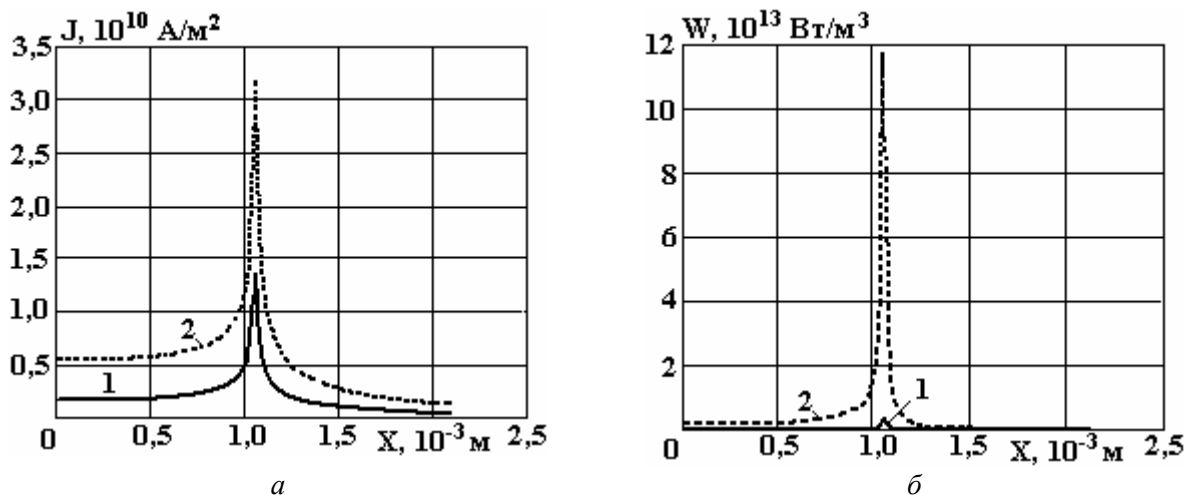


Рис. 6. Распределения плотности тока (а) и мощности (б) при $t = 1$ и 4,15 мс. Случай постоянного радиуса контактного пятна. t , мс: 1 – 1; 2 – 4,15

Перейдем к рассмотрению потоков тепла. Линейные графики распределения Х-компоненты теплового потока вдоль оси ОХ и Y-компоненты вдоль оси ОУ в различные моменты времени приведены на рис. 7. Вдоль горизонтального пути тепло распространяется в противоположные стороны из области максимального тепловыделения, причем тепловой поток внутрь контактного пятна оказывается в любой момент времени меньше, чем тепловой поток наружу.

Учет расплывания контактного пятна

Учтем теперь расплывание контактного пятна. Момент начала увеличения радиуса соответствует прогреву области контакта до температуры размягчения. На рис. 8 приведено контурное распределение температуры в окрестности контактного пятна в момент времени 4,15 мс (момент начала

плавления для первого случая). Качественно картина распределения близка к рассмотренному выше случаю (рис. 4), но контакт прогреет до существенно меньшей температуры.

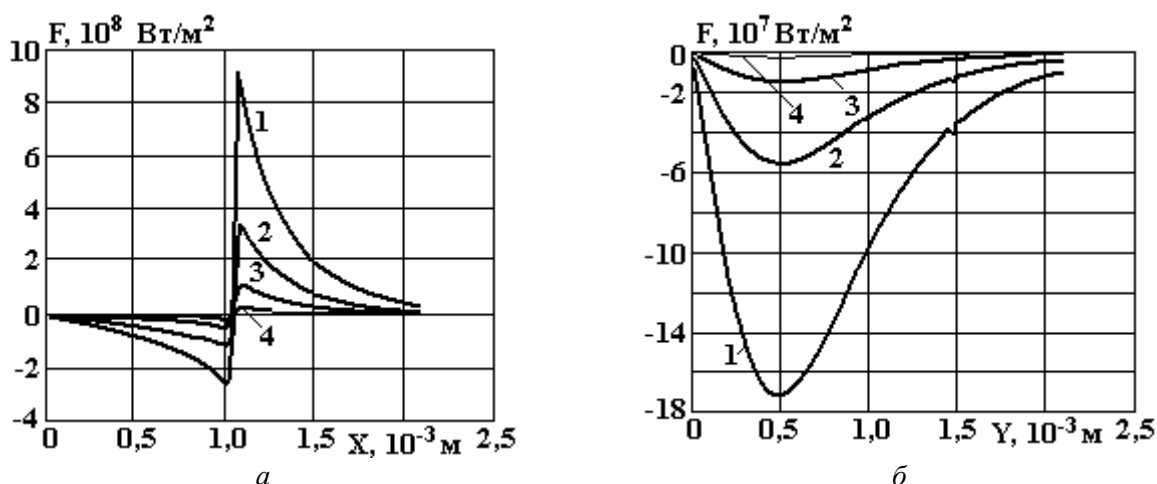


Рис. 7. Распределения X-компоненты (а) и Y-компоненты (б) потоков тепла в разные моменты времени. Случай постоянного радиуса контактного пятна. t , мс: 1 – 4,15; 2 – 3; 3 – 2; 4 – 1

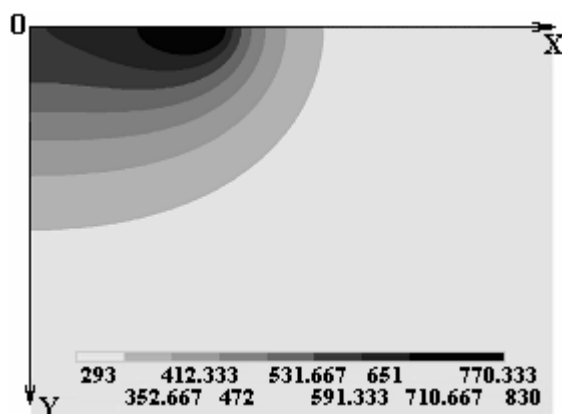


Рис. 8. Контурный график распределения температуры в области контактного пятна при $t = 4,15$ мс. Случай изменяющегося радиуса контактного пятна

Для проведения более детального анализа перейдем к рассмотрению линейных графиков. На рис. 9 представлены распределения температуры вдоль оси OX и оси OY в различные моменты времени.

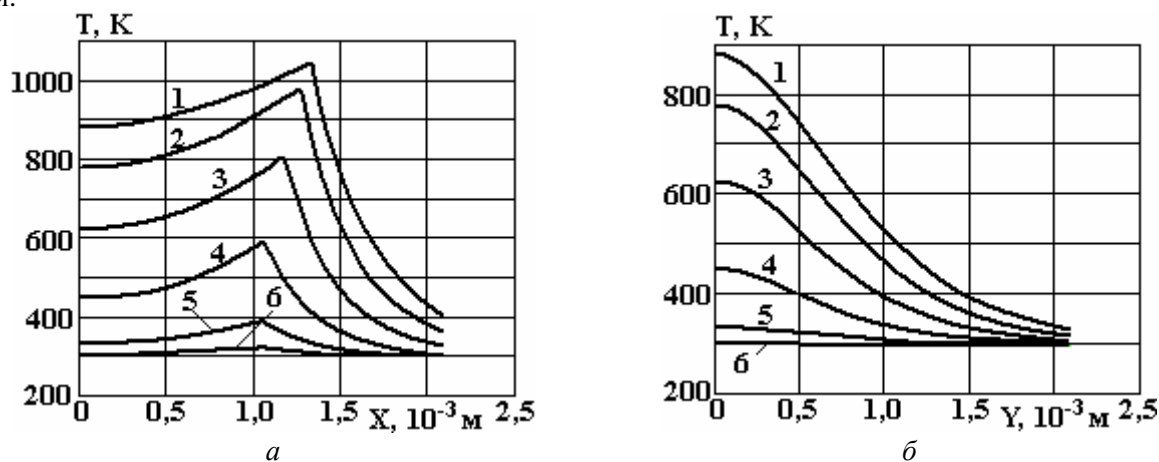


Рис. 9. Распределения температуры в различные моменты времени. Случай изменяющегося радиуса контактного пятна. 1 – 6; 2 – 5; 3 – 4; 4 – 3; 5 – 2; 6 – 1 мс

Сравнивая распределения температуры вдоль оси OX для двух рассматриваемых случаев (рис. 5,а и 9,а), можно заметить, что с началом увеличения контактного пятна максимальное значение температуры растет не так быстро, как в случае постоянного радиуса, и неравномерность нагрева

контактного пятна также уменьшается. Кроме того, максимум температуры перемещается от центра пятна, оставаясь все время на его границе. Это связано с соответствующими изменениями в распределении выделяющейся мощности и перераспределением тепловых потоков, вызванных расплыванием пятна.

В распределении плотности тока вдоль оси OX (рис. 10,а) имеются следующие особенности. Во-первых, ее максимум удаляется от оси электродов вслед за перемещением границы контактного пятна и в каждый момент времени располагается на краю пятна. Во-вторых, отношение значения плотности тока в центре контактного пятна к значению плотности тока у края контактного пятна уменьшается. Так же как и в предыдущем случае, мощность (рис. 10,б) в основном выделяется в кольце вблизи края контактного пятна, который удаляется от центра, способствуя тем самым более равномерному прогреву пятна.

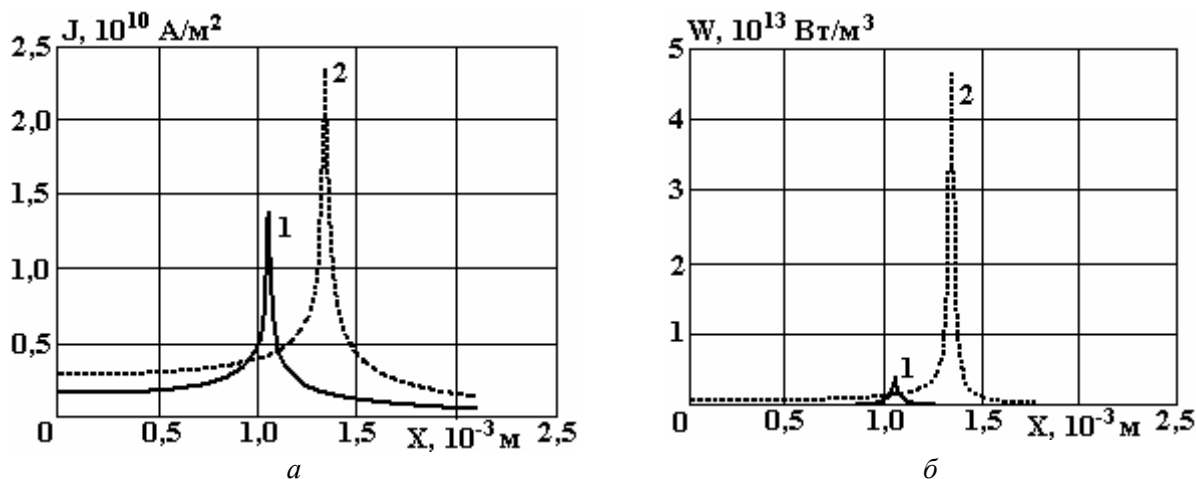


Рис. 10. Распределения плотности тока (а) и мощности (б) при $t = 1$ и 6 мс. Случай изменяющегося радиуса контактного пятна. t , мс: 1 – 1; 2 – 6

Кроме того, если сравнить распределения плотности тока и мощности в случае постоянного и переменного радиуса контактного пятна (рис. 11,а и б) в один и тот же момент времени, то максимальные величины плотности тока, и особенно мощности, во втором случае оказываются меньше.

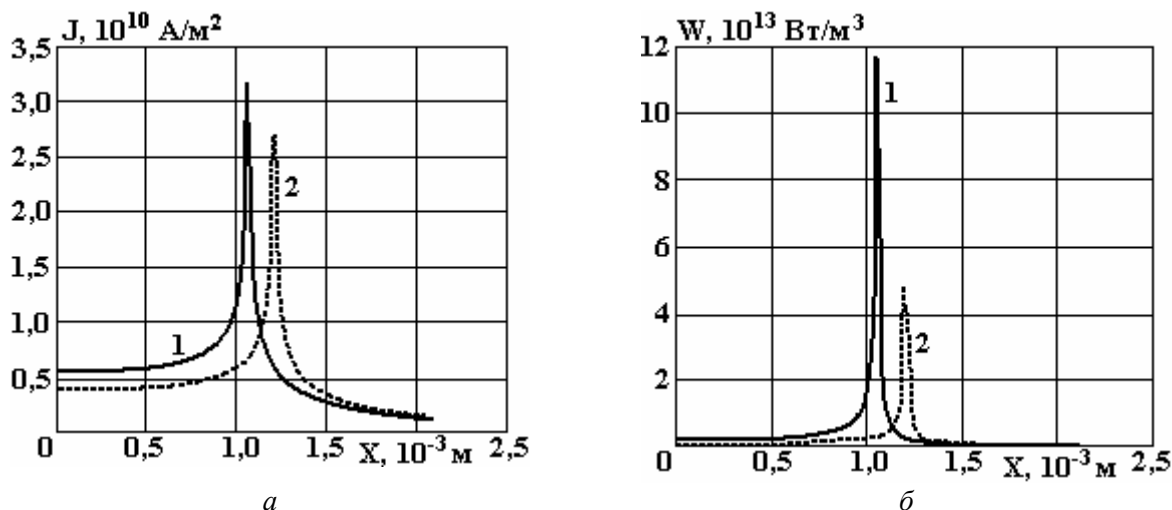


Рис. 11. Распределения плотности тока (а) и мощности (б) в момент времени 4,15 мс. Сплошная линия соответствует случаю постоянного радиуса, пунктирная – случаю изменяющегося радиуса. 1 – $a = \text{const}$; 2 – $a = a(t)$

Рассмотренные выше особенности распределения выделяемой мощности приводят к соответствующим распределениям тепловых потоков. На рис. 12 приведены распределения X -компоненты теплового потока вдоль оси OX и Y -компоненты теплового потока вдоль оси OY .

Сравним распределения X -компоненты теплового потока вдоль оси OX для случаев постоянного и переменного радиуса контактного пятна в различные моменты времени (рис. 13). Сплошная линия соответствует случаю постоянного радиуса, пунктирная – случаю переменного радиуса.

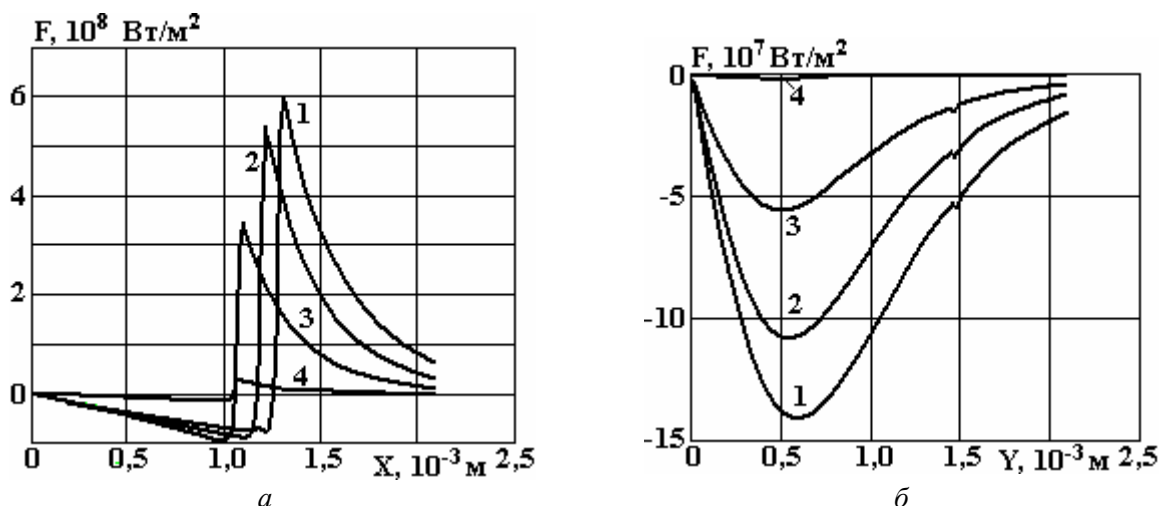


Рис. 12. Распределения X-компоненты (а) и Y-компоненты (б) потоков тепла в различные моменты времени 1, 3, 4, 5 мс. Случай изменяющегося радиуса контактного пятна

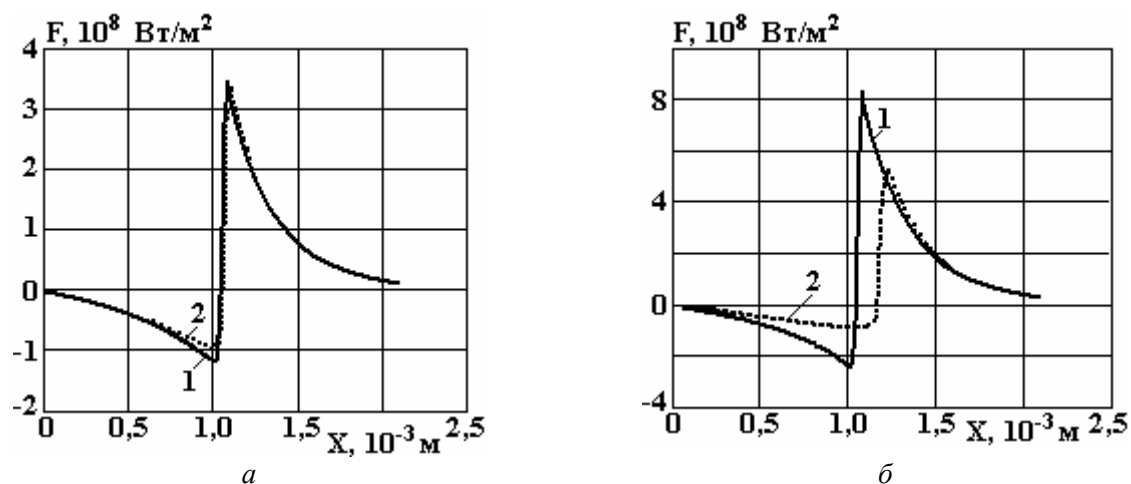


Рис. 13. Распределения X-компоненты теплового потока. Сплошная линия соответствует случаю постоянного радиуса, пунктирная – случаю изменяющегося радиуса. а – $t = 3$ мс; б – $t = 4$ мс

До достижения температуры размягчения материала потоки тепла в обоих случаях практически совпадают. После того как радиус контактного пятна начинает увеличиваться, максимальные значения потока тепла внутрь пятна и наружу становятся меньше по абсолютному значению, чем в случае постоянного радиуса. Кроме того, относительная величина теплового потока, идущего внутрь пятна и приводящая к его нагреву, во втором случае становится меньше, чем в первом. Это и приводит к существенному замедлению нагрева пятна при его расплывании.

Выводы

В данной работе проведено численное моделирование импульсного нагрева электродов в широком диапазоне температур, вплоть до температуры плавления. Результаты расчетов показали, что эффект увеличения радиуса контактного пятна, связанный с размягчением материала, оказывает существенное влияние на динамику нагрева. Учет этого эффекта приводит к значительному уменьшению максимальной температуры в области контакта. Это связано с тем, что при расплывании контактного пятна область максимального тепловыделения, которая сильно локализована, перемещается вслед за границей пятна. Следствием этого является также более равномерный нагрев пятна.

Проведение численного моделирования прохождения тока через электрические контакты в приближении постоянного радиуса контактного пятна возможно только в том случае, когда температура в контактной области существенно не превышает температуру размягчения материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хольм. Р. *Электрические контакты*. М.: Иностранная литература, 1961.
2. Мышкин Н.К., Кончиц В.В., Браунович М. *Электрические контакты*. М.: Издательский дом Интеллект, 2008.

3. Chaly A., Dmitriev V., Pavleyno M., Pavleyno O. Experimental research and computer simulation process of pulse heating high current contacts of vacuum interrupters. *Proceedings of the 24th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum*. Braunschweig, Germany. 2010, **2**, 418–423.
4. Pavleino O.M., Pavlov V.A. and Pavleino M.A. Verification of the boundaries of the applicability of the holm approximation for the calculation of the resistance of electric contacts. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2010, **46**(5), 440–446.
5. Monnier A., Froidurot B., Jarrige C., Meyer R., Teste P. A Coupled-Field Simulation of an Electrical Contact during Resistance Welding. *Proceedings of the 52d IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*. 2006, p. 95–102.
6. Monnier A., Froidurot B., Jarrige C., Testé P., Meyer R. A Mechanical, Electrical, Thermal Coupled-Field Simulation of a Sphere-Plane Electrical Contact. *Proceedings of the 52d IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*. 2007, p. 787–795.
7. Abdi El., Beloufa R., Benjemaâ A. N. Contact resistance study of high-copper alloys used in power automotive connectors. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. 2008, **222**(8), 1375–1383.
8. Павлейно О.М., Павлейно М.А., Павлов В.А., Статуя А.А. Численное моделирование процессов импульсного нагрева электрических контактов. *Сборник трудов IX Международной научной конференции "Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей"*. Санкт-Петербург. 2009, с. 292–297.

*Поступила 15.11.10
После доработки 19.01.11*

Summary

The article deals with the numerical simulation of pulse heating of electrical contacts in a wide temperature range up to the melting point, which is based on experimental oscillograms of the electrode current and voltage. The variation of contact spot radius is found with account of material softening. It is shown that rather a small spot expansion can cause a considerable decrease of contact temperature. Dynamics of contact spot heating is analyzed, and distributions of temperature and heat flows are plotted.
