

Si1+x при малых отклонениях от стехиометрии // Журн. техн. физики. – 2001. - Т.71. - Вып.8. - С.109-111.

8. Мелких А.В., Повзнер А.А., Андреева А.Г., Сачков И.Н. Неравновесные фазовые переходы и s-образные вольт-амперные характеристики в системе полупроводник-металл // Письма в журн. техн. физики. – 2001. - Т.27. - Вып.6. - С.19-25.

9. Крюк В.В., Пилюгин А.В., Повзнер А.А., Сачков И.Н. Особенности формирования резистивных состояний с аномально малыми температурными коэффициентами электросопротивления в гетерогенных системах Fe Si – Fe Si2 // Инж. физич. журн. – 2002. - Т.75. - №3. - С. 171-175.

10. Сачков И.Н., Повзнер А.А. Электронный переход полупроводник-металл и особенности проводимости гетерофазных систем Fe Si – Fe Si2 // Физика тверд. тела. 1996. - Т. 38. - Вып. 10. - С. 2969-2972.

11. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. - М.: Мир, 1979. - 392 с.

**Сачков И.Н., Каржавин В.В., Копылов С.Н.**

### **РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ МИКРОКОНТАКТНЫХ ЯВЛЕНИЙ, ОСНОВАННОЙ НА ИСПОЛЬЗОВАНИИ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Одна из наиболее общих проблем, возникающих при конструировании электрических машин и оптимизации режимов их работы, обусловлена необходимостью моделировать процессы рассеяния тепла. Зачастую работоспособность изделий и их ресурс ограничиваются деградационными процессами, возникающих в различных контактных парах при протекании через них потоков электричества и тепла.

Известно, что любой разъемный макроскопический контакт осуществляется через совокупность пятен касания, которые, в свою очередь, реализуются через микроконтакты [1]. Эксплуатация электрических машин сопровождается распространением потоков тепла, электричества и массы, пересекающих поверхности электрических, механических и тепловых контактов. В области микроконтактов потоки тепла или электричества формируют области стягивания потоков, характеризующихся высокими температурами, искривлениями линий тока и большими значениями градиента термодинамического потенциала. При этом в микрообъемах контактов могут происходить процессы плавления, окисления, деформации, выкрашивания, а также переноса вещества с контакта на контакт путем механизмов диффузии, механического переноса и сплавления,

[2]. Течение подобных деградиционных процессов в значительной мере определяется характером пространственного распределения температуры.

В настоящее время принято характеризовать поле температур, реализующееся в контактной паре, с помощью совокупности трех параметров: 1) средней объемной температуры,  $T_V$ , 2) средней температуры поверхности  $T_S$  и 3) локальной температуры микроконтакта  $T_{Mc}$  (температуры вспышки) [3].

Значения этих параметров могут быть оценены с помощью ряда экспериментальных методов. Первая из перечисленных величин измеряется наиболее просто, например, с помощью термопар. Значение  $T_S$  оценивают, в частности, используя явление термоэлектронной эмиссии, путем фиксации контактной разности электрических потенциалов. При этом устанавливается величина, усредненная по всей поверхности трения. Наиболее сложно оказывается определить третью величину. Это удастся осуществлять косвенными путями, например, проводя металлографический анализ поверхностей, подвергнутых трению, используя термочувствительные вещества и т.д. [3]. Известно, что в отдельных точках поверхности температура микроконтакта может превышать среднюю объемную температуру на сотни градусов [4]. Установить же полную зависимость от координаты значения температуры в окрестности каждого из микроконтактов экспериментальными методами не удается.

Следует отметить также, что обсуждавшиеся выше интегральные экспериментальные параметры имеют оценочный характер. Их практическая ценность может быть повышена, если дополнять результаты опытов расчетами температур модельных объектов [4]. При этом традиционным расчетным подходом к установлению температурных полей в контактных парах служит аналитическое решение дифференциальных уравнений теплопроводности. Однако следует отметить, что существующие аналитические методы [5-6] удастся реализовать лишь путем значительной идеализации геометрии теплопроводящей системы. Это приводит, в частности, к тому, что локальные и неоднородные особенности распространения потоков в неоднородной среде оказываются вне поля зрения исследователя.

Модель микроконтакта.

Цель настоящей работы – разработка модели микроконтакта, позволяющей устанавливать основные геометрические особенности распределения температуры в обсуждаемых объектах. При этом целесообразно базироваться на методе конечных элементов (МКЭ). Этот метод [7] широко используется в настоящее время для решения множества прикладных задач теплотехники и сопротивления материалов. Его привлекательные особенности - необычайные гибкость описания геометрических особенностей обсуждаемых процессов пе-

реноса и адаптированность алгоритмов к компьютерной реализации. В частности, он использовался нами для описания процессов переноса и фазовых превращений в пространственно неоднородных и двухфазных системах (см. [8-10] и ссылки там). Между тем в работах, посвященных изучению процессов деградации электрических контактов, он до сих пор не применялся. В настоящей публикации установим с его помощью геометрические особенности поля температур, формирующегося в окрестностях микроконтактов. При этом ограничимся изучением следующей модельной ситуации.

Рассмотрим контактную пару, характеризующую в сечении простейшей прямоугольной формой, схема которой представлена на рис. 1а.

В области контактной поверхности  $S$  происходит выделение тепла, создающее плотности потоков тепла  $Q_1$  и  $Q_2$ , изображенных на рис. 1а стрелками. Величину суммарного потока считаем равным  $Q = Q_1 + Q_2$ . Соотношение  $Q_1 / Q_2$  определяется теплофизическими характеристиками пары 1 и 2. К последним относятся, в частности, значения эффективных коэффициентов теплопередачи в области контакта, коэффициенты теплопроводности материалов  $\lambda_1$  и тепловые граничные условия фрикционных пар. В случае идентичности пар обсуждаемое отношение равно  $1/2$ .

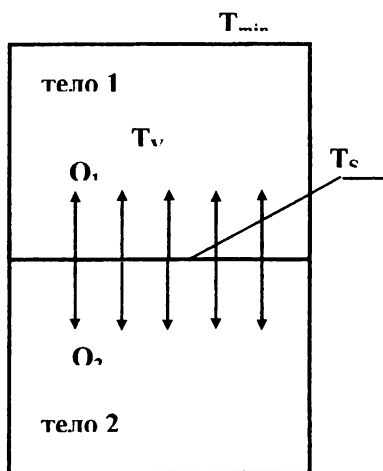


Рис. 1а

Учтем далее, что механический макро- контакт осуществляется посредством отдельных хаотически распределенных микроконтактов, размер которых как правило много меньше расстояния между ними. В области каждого из контактов генерируется тепло, которое распространяется вглубь материала и соз-

дает соответствующее распределение температур. Установим создаваемое потоком тепла распределение температур в контактном теле 1.

Осуществим идеализацию геометрии системы, используя алгоритм, развитый в работах Г.Н. Дульнева (см. в частности [11]) для описания процессов переноса в микрогетерогенных средах. Прежде всего, положим, что микроконтакты имеют форму круглых площадок  $S_{Mc}$ , плоскости которых параллельны плоскости  $S$ . Они характеризуются одинаковым радиусом  $R_{Mc}$ . Считаем, что их центры расположены регулярно, образуя на поверхности  $S$  узлы гексагональной плотноупакованной решетки. На рис. 1b изображена схема части контактной поверхности для подобной идеализированной системы.

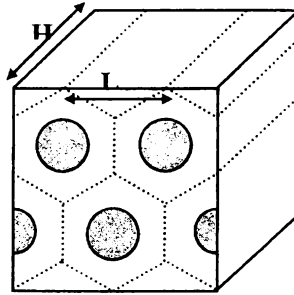


Рис. 1 б

Пунктирными линиями представлены границы элементарных ячеек, совокупность которых образует рассматриваемое контактное тело.

Будем полагать, что величина поверхности  $S$  много больше площади основания элементарной ячейки  $S_c$ , так что подавляющая часть микроконтактов расположена достаточно далеко от краев  $S$ . При этом, учитывая, что  $N$  – общее число контактов, реализующихся на поверхности  $S$ , получим, что площадь основания одной элементарной ячейки равна  $S_c = S / N$ .

Рассмотрим общие особенности процесса распространения тепла в подобной ячейке. В обсуждаемых условиях в элементарных ячейках, удаленных от краев  $S$ , расположенных регулярно, тепловые процессы оказываются геометрически идентичными. При этом эти ячейки оказываются отделенными друг от друга системами плоскостей, перпендикулярных поверхности  $S$ , являющимися плоскостями зеркальной симметрии для тепловых процессов, реализующихся в ячейках. Можно считать эти поверхности непроницаемыми, «адиабатическими» для теплового потока. При этом элементарные ячейки приобретают вид шестигранных призм. Для описания теплопереноса в макро-области  $V$  достаточно решить задачу теплопереноса в пределах лишь одной элементарной ячейки, имеющей объем  $V_c = V / N$  и площадь основания  $S_c$ . В центральной

части ее шестигранного основания расположен микроконтакт  $S_{Mc}$  и источник потока тепла, плотность которого полагаем постоянной и равной

$$q_{Mc} = (Q_1 / S) (S_C / S) = Q_1 S_C / S^2. \quad (1)$$

В условиях сухого трения пространство между микроконтактами заполнено воздухом, коэффициент теплопроводности которого много меньше, чем у материала фрикционного тела. Кроме того, как правило, можно пренебрегать лучистым теплообменом. Поэтому участки поверхности  $S$ , окружающие микроконтакт  $S_{Mc}$ , образуют практически адиабатическую поверхность.

Обычно толщина контактного тела  $H$  на несколько порядков величины больше размера микроконтакта  $R_{Mc}$ . Можно предположить, что на некотором, достаточно большом, осевом расстоянии  $Y_C$  от центра  $O$  шестигранника  $S_C$  радиальные сечения окажутся практически изотермическими.

Методика расчетов.

Задача расчета пространственного распределения температуры в подобной ячейке является, вообще говоря, трехмерной. Идеализируем далее систему, заменив призматические элементарные области цилиндрическими, имеющими объем  $V_C$  и площадь основания  $S_C$ , такими же, как и у призматической. Диаметр этой цилиндрической ячейки должен составлять величину  $D_C = (S / N \pi)^{1/2}$ .

На рис.1с представлена схема осевого сечения обсуждаемой цилиндрической элементарной ячейки.

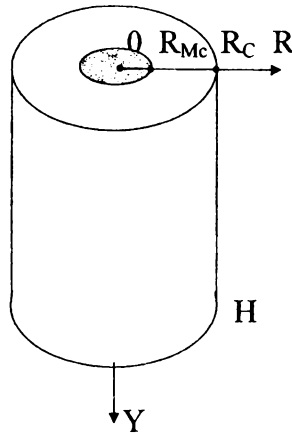


Рис. 1 с

В рассматриваемых условиях процесс распространения тепла становится двумерным, обладающим аксиальной симметрией. Для его описания используем цилиндрическую систему координат  $(Y,R)$ , совместив ее центр с центром основания ячейки. Аксиальную ось  $Y$  направим вглубь цилиндра элементарной

ячейки, перпендикулярно его основанию. Ограничимся рассмотрением модельной ситуации, когда температурное поле в окрестности микроконтакта оказывается установившимся, стационарным.

Поставим граничные условия задачи. В области микроконтакта  $S_{Mc}$  будем полагать реализацию граничных условий второго рода, считая, что задано значение плотности потока тепла, входящего в расчетную область. При этом будем полагать, что значение плотности потока постоянно в пределах пятна микроконтакта и составляет  $q_{Mc}$ . Таким образом,

$$\lambda (\partial T / \partial Y) = q_{Mc}, \quad (2)$$

в пределах области поверхности, когда  $Y = 0$ ,  $R_{Mc} \geq R \geq 0$

В верхней части расчетной области  $Y = Y_C$  выполняются граничные условия первого рода, температура считается фиксированной, равной

$$T = T_0, \quad (3)$$

Величина  $Y_C$  выбирается таким образом, чтобы обеспечить выполнение условия изотермичности с точностью не хуже 1%.

На оставшейся части границы расчетной области, характеризуемой условиями  $Y = 0$ ,  $R_C \geq R \geq R_{Mc}$ , где  $R_C = D_C / 2$ , предполагаем существование условий адиабатичности

$$\lambda (\partial T / \partial R) = 0. \quad (4)$$

Для установления пространственного распределения поля температур используем вариационный принцип, согласно которому стационарное распределение температуры  $T(R, Y)$  в рассматриваемой пространственно неоднородной неравновесной системе определяется экстремумом функционала

$$\chi = \int_{V_C} \lambda (\text{grad } T)^2 dV + \int_{S_{Mc}} q T dS, \quad (5)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $V_C$  – объем ячейки;  $S_{Mc}$  – поверхность, на которой действуют граничные условия второго рода.

Нахождение функции  $T(R, Y)$ , минимизирующей величину  $\chi$ , осуществим методом конечных элементов. С этой целью осуществим дискретизацию сечения объема  $V_C$  треугольными симплекс-элементами.

Результаты расчетов.

Описываемый алгоритм был реализован в форме программы на языке Фортран для ЭВМ типа IBM PC. С ее помощью был проведен компьютерный эксперимент по исследованию геометрических особенностей температурных полей, реализующихся в окрестностях микроконтактов. Как правило, использовались сетки разбиений плотностью  $200 \times 200$  элементов. Погрешности расчетов значений температуры оценивались с помощью методик, описанных в цитированных выше работах [8-10]. При этом во внимание принимались лишь те

результаты, которые характеризовались относительной погрешностью, не превышающей 2%.

Нетрудно видеть, что в идеальном случае, когда микроконтакт осуществляется по всей макроскопической контактной поверхности, то есть, если  $R_{Mc} = R_C$ , поле температур зависит линейно от одной лишь осевой координаты  $Y$ :

$$T_0(Y) = T_{min} + Q_1 (H - Y) / (S \lambda), \quad (6)$$

где  $T_0(Y)$  – идеализированная зависимость температуры от координаты  $Y$ ,  $H$  – толщина контактного тела,  $T_{min}$  – минимальная температура, реализующаяся на наружной поверхности. Представляет интерес выяснить, как меняется обсуждаемое распределение в условиях, когда величина  $R_{Mc}$  уменьшается. С этой целью будем рассчитывать величины относительных отклонений температуры от идеальной линейной. Охарактеризуем подобное отклонение безразмерной величиной

$$\theta = (T - T_0) / T_0 \quad (7)$$

Результаты подобных расчетов целесообразно обобщать и систематизировать с помощью безразмерных и относительных величин, [4]. Введем безразмерные координаты  $r = R / R_C$ ,  $y = Y / R_C$  и безразмерный радиус микроконтакта  $r_{Mc} = R_{Mc} / R_C$ .

На рис.2 приведены характерные зависимости относительного изменения температуры  $\theta(y)$ , реализующиеся в осевой части (то есть при  $r = 0$ ) цилиндрической элементарной ячейки микроконтакта при изменении безразмерной координаты  $y$ .

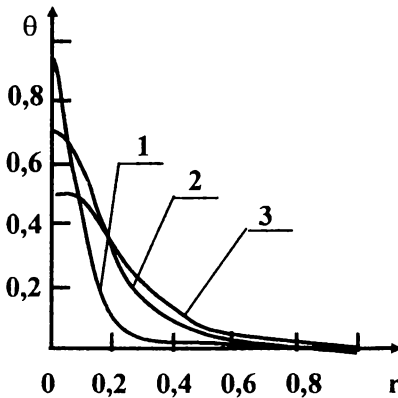


Рис. 2

Обсуждаемые данные получены для значения параметра  $r_{Mc} = 0,1$ . Видно, что возмущение линейного хода  $T(Y)$ , то есть заметное отклонение  $\theta$  от нуля, сосредоточено в непосредственной близости от центра микроконтакта, при  $y <$

$r_{Mc}$ . При этом в центре микроконтакта имеют место весьма значительные перегревы, характеризуемые величиной максимального относительного перегрева  $\theta_{max} = \theta(0)$ . Следует отметить, что установленные графики зависимостей  $\theta(y)$  имеют форму, подобную гауссовой. Подробный анализ их характера и применимости гауссовой аппроксимации выходят за рамки настоящей работы. Следует лишь отметить, что дисперсия обсуждаемой зависимости тем больше, чем меньше величина  $r_{Mc}$ .

Систематизация результатов расчетов значений зависимости  $\theta_{max}(r_{Mc})$  приводит к выводу, что величина относительного перегрева может весьма существенно меняться в результате варьирования величины относительного размера микроконтакта. В частности, если  $r_{Mc} \geq 0,1$ , то с точностью не хуже 5% имеет место равенство

$$1/\theta_{max} \approx r_{Mc}. \quad (8)$$

Таким образом, чем меньше его величина, чем дальше контакты отстоят друг от друга, тем большее значение температуры вспышки  $T_{max}$  может реализоваться на контактной поверхности. Используя полученные значения относительного перегрева, нетрудно пересчитать их для получения абсолютных значений. В частности, в обсуждаемых условиях максимальное значение температуры может быть оценено с помощью следующего выражения

$$T_{max} \approx (R_{Mc}/R_C + 1) (T_{min} + qH/\lambda), \quad (9)$$

здесь  $T_{min}$  – значение минимальной температуры, реализующейся на внешней поверхности контактного тела,  $H$  – его толщина,  $q$  – средняя плотность теплового потока, генерируемого на контактной поверхности,  $R_{Mc}$  – размер микроконтакта,  $R_C$  – половина расстояния между соседними микроконтактами.

В качестве примера рассмотрим следующую ситуацию. Положим  $Q_1 = Q_2 = 5$  Вт,  $S = 10^{-4}$  м<sup>2</sup>,  $\lambda = 50$  Вт/м град.,  $H = 1$  см. Тогда идеализированная (средняя) температура контактной поверхности составит  $T_{os} = T_{min} + 20$  град. Пусть  $T_{min} = 0$  град, средний радиус микроконтактов в 20 раз меньше среднего расстояния между их центрами. В данной ситуации  $r_{Mc} = 0,1$ ,  $\theta = 10$  и, в соответствии с (9), температура в центре микроконтакта составит  $T_{Max} = 220$  град. То есть в обсуждаемых условиях температура вспышки, обсуждавшаяся во введении, превышает среднюю по поверхности  $T_S$  на 200 град.

Анализ пространственного распределения изотерм, реализующихся в окрестности микроконтакта, позволил нам сделать также вывод о возникновении существенных термических напряжений, сконцентрированных в области кольцеобразной формы, расположенной на контактной поверхности  $S$  в пределах микроконтактной площадки.



Понятно, что получаемые описываемым методом оценочные значения температуры могут существенно меняться в зависимости от выбора значений обсуждаемых параметров. При этом весьма значительным фактором оказывается относительный размер микроконтакта. Известно, что его величина может существенно меняться в зависимости от качества обработки контактной поверхности, механических свойств материала и прижимного усилия, [1]. Кроме того, размер микроконтакта может меняться и под действием высоких температур, за счет снижения предела прочности материала (и, соответственно в результате пластической деформации микровыступов контактной поверхности). По мнению авторов, вероятен процесс своеобразной самоорганизации. Если рассеиваемая мощность превысит некоторое предельное значение, реализуются либо разрушение микроконтакта, либо самопроизвольное увеличение его радиуса до «приемлемой» величины. Обсуждение подобных эффектов предполагается осуществить в наших дальнейших публикациях. Установленные закономерности формирования пространственных распределений температуры в различных условиях позволяют также в дальнейшем рассмотреть ряд процессов, инициируемых высокими температурами, в частности изменения механических свойств, диффузии атомов, адгезии и окисления материалов контактных пар.

Заключение.

Проведенное выше обсуждение позволяет сформулировать следующие выводы. 1) Температурные поля в окрестности микроконтактов характеризуются относительными перегревами, зависимости которых от безразмерной координаты  $\theta$  ( $r$ ) описываются функциями, подобными гауссовым.

2) В обсуждавшихся условиях величины максимальных относительных перегревов микроконтактов приближенно обратно пропорциональны среднему размеру микроконтакта и пропорциональны среднему расстоянию между их центрами.

3) В области контактного тела, непосредственно окружающей микроконтакт, могут формироваться области значительных термических напряжений.

4) Подход, основанный на использовании метода конечных элементов открывает возможность дальнейшего создания и развития моделей физико-химических процессов, реализующихся в микроконтактах узлов электрических машин.

#### Библиографический список

1. Демкин Н.Б. Контактное шероховатых поверхностей. - М.: Наука, 1970 - 227 с.
2. Хольм Р. Электрические контакты. - М.: ИЛ, 1961 - 464 с.

3. Крагельский И.В. Трение и износ. - М.: Машиностроение, 1968 - 480 с.
4. Браун Э.Д., Евдокимов Ю.А., Чичинадзе А.В. Моделирование трения и изнашивания в машинах. М.: Машиностроение, 1982 – 191 с.
5. Беляев Н.М., Рядно А.А. Методы теории теплопроводности. - М.: Высшая школа, 1982. Ч. 1 - 327 с.
6. Лыков А.В. Теплообмен. Справочник. - М.: Энергия, 1971 - 560 с.
7. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. - М.: Мир, 1979 - 392 с.
8. Сачков И.Н. Влияние формы включений на проводимость двумерных регулярных матричных систем //Журн. технич. физики. - 1996. - Т. 66. - Вып. 12.- С. 48-58.
9. Сачков И.Н. Режимы радиальной перекоденсации в цилиндрических объемах //Теплофиз. выс. темп. 1995. - Т. 33. - № 5. - С. 759-764
10. Сачков И.Н. Применение метода конечных элементов (МКЭ) для прогнозирования дефектов при непрерывном литье сплавов // Кристаллизация и компьютерные модели /НИИ математического моделирования . Ижевск, 1994. С. 46-60.
11. Дульнев Г.Н., Новиков В.В. Процессы переноса в неоднородных средах. - Л.: Энергоатомиздат. 1991 - 258 с.

**Обабкова Н.Е**

### **СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСОВ РЕЖИМА ЗАЗЕМЛЕНИЯ НЕЙТРАЛИ В СЕТЯХ 6-35 КВ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ И БОРЬБЫ С ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯМИ В ЭТИХ СЕТЯХ**

Введение. Цель данной статьи – изложить основные моменты IV всероссийской научно-технической конференции «Ограничение перенапряжений. Режимы заземления нейтрали. Электрооборудование сетей 6-35 кВ», проведенной в г. Новосибирске с 26 по 28 августа 2006 г., осветить новые разработки, представленные там, мнения специалистов различных профилей, принявших в ней участие, интересные решения, родившиеся в обсуждениях, спорах, обмене опытом, осветить различные точки зрения, естественно, включая и спорные.

ГЕОГРАФИЯ (представили доклады): Россия (г. Москва: А.А. Челазнов, А.В. Иванов, Ю.Н.Звонарев, В.В. Фоменко (ООО «ВНИИГАЗ»), В.А. Кричко, И.А. Миронов (Филиал ОАО «Инженерный центр ЕЭС» - фирма «ОРГРЭС»), А.А. Михель (ОАО «ГАЗПРОМ»), г. Санкт-Петербург: В.Г. Езерский (ООО НТЦ «Механотроника»), г. Екатеринбург: Н.Е. Обабкова, А.А. Кокарев (ООО