

Изменение характеристик контактных пятен при протекании токов короткого замыкания через замкнутые сильноточные электрические контакты

© А.В. Хрестин, М.А. Павлейно, М.С. Сафонов

Санкт-Петербургский государственный университет, физический факультет,
198504 Санкт-Петербург, Старый Петергоф, Россия
e-mail: s.pavleino@yandex.ru

Поступило в Редакцию 5 октября 2022 г.

В окончательной редакции 1 ноября 2022 г.

Принято к публикации 2 ноября 2022 г.

Проведено численное моделирование нагрева окрестностей контактных пятен замкнутых медных сильноточных контактов токами короткого замыкания различной формы. Установлена связь параметров тепловых и механических полей при нагреве до температур, превышающих температуру рекристаллизации материала. Показана динамика изменения размеров областей упругих и пластических деформаций и их локализации. Выявлено, в каких случаях результаты нагрева контактных окрестностей могут существенно отличаться при протекании термически эквивалентных токов.

Ключевые слова: короткое замыкание, сильноточный контакт, температура рекристаллизации, деформации.

DOI: 10.21883/JTF.2023.01.54075.233-22

Введение

При протекании токов короткого замыкания через замкнутые сильноточные контакты в местах непосредственного контактирования, как правило, происходят необратимые изменения механических свойств материала, вызванные нагревом выше температуры рекристаллизации. Происходит так называемое размягчение материала, приводящее к увеличению размера контактных пятен (КП), через которые протекает ток, и к изменению сопротивления контактов.

Контактное сопротивление является основной характеристикой, влияющей на динамику и уровень нагрева контактов протекающими аварийными токами. Его величина в произвольный момент времени определяется двумя факторами. Во-первых, размером и формой КП в данный момент, что зависит от распределения механических свойств материала вблизи пятна при заданной силе контактного нажатия; во-вторых, распределением температуры в его окрестности, влияющего на распределение удельного сопротивления. В этом смысле исследование изменения характеристик теплового и механического поля контактов при импульсном нагреве представляет собой актуальную задачу.

Решение данной задачи сопряжено с рядом существенных затруднений. В первую очередь следует отметить, что экспериментально измерить температуру КП невозможно даже в стационарном режиме, когда пятно прогрето равномерно. Тем более это невозможно для импульсных токовых воздействий малой длительности, когда следует говорить не о температуре пятен, а о тепловых полях в их окрестности.

Это же касается и механических полей, экспериментальное исследование которых крайне затруднительно. Некоторые выводы об изменении механических свойств материала в результате их нагрева можно сделать, применяя существующие методы изучения строения металлов. Например, можно оценить размеры области, в которой произошло размягчение материала по изменению структуры материала, вызванной рекристаллизацией. Однако в современной литературе по контактным задачам нет источников, где были бы приведены результаты подобных исследований.

По-видимому, наиболее эффективным способом анализа процессов, вызванных прохождением токов короткого замыкания, локализованных в окрестностях КП, является численное моделирование.

К настоящему времени опубликовано достаточно большое количество работ, посвященных нагреву элементов главных цепей электрических аппаратов токами короткого замыкания. В большинстве из них сами контакты рассматриваются как составные части токоведущих систем, и тепловыделение в них учитывается приближенно. Например, в работах [1–3] предполагается, что радиус КП и соответственно контактное сопротивление изменяется мгновенно при достижении температуры размягчения материала. То есть для проведения расчетов требуется предварительное проведение экспериментов. При этом изменение температуры самих КП во времени оценивается по методу Хольма–Кольрауша [4], который справедлив, строго говоря, только для стационарных процессов. Механические характеристики окрестностей КП при таком подходе расчетам и оценкам не подлежат. Заметим, что приближение мгновенного изменения радиуса КП при размягчении может приводить к значи-

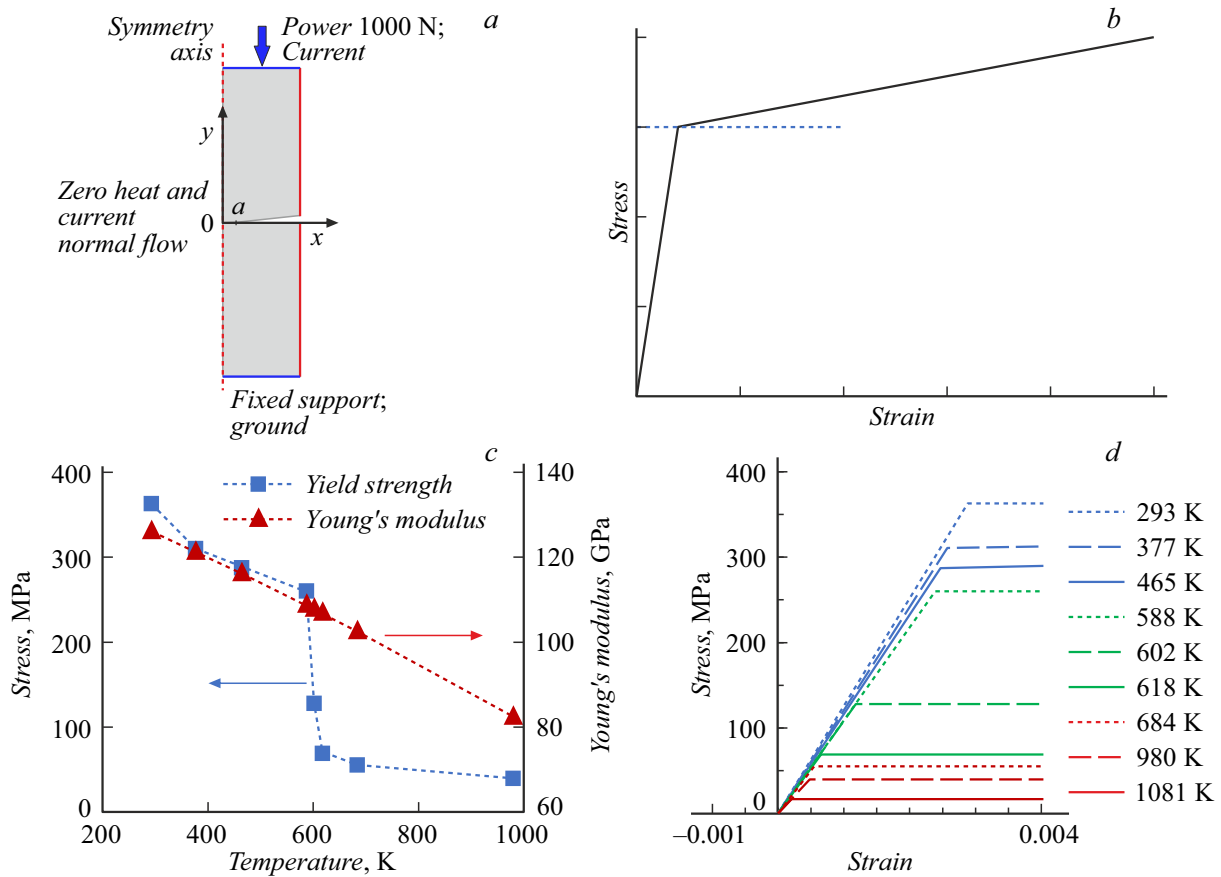


Рис. 1. Расчетная модель и граничные условия (a), характерный вид σ - ϵ -кривой (b), зависимость модуля Юнга и предела текучести от температуры (c), семейство σ - ϵ -кривых для различных температур (d).

тельному занижению расчетных значений температуры, так как в реальной ситуации радиус изменяется в течение единиц миллисекунд.

Более достоверный способ расчета нагрева контактной окрестности аварийными токами, основанный на итерационном подборе размера КП, был применен в [5,6]. Он позволяет описать нагрев и изменение размера КП в широком диапазоне температур, вплоть до плавления, но не дает информации об изменении механических характеристик при нагреве. К тому же он также предполагает наличие экспериментальных данных — осциллограмм тока и контактного напряжения, что делает метод неавтономным.

Существует еще один способ прямого расчета прохождения токов короткого замыкания через контакты и смежные с ними части токоведущих систем, основанный на численном решении термо-электро-механической контактной задачи. Он является автономным, не требующим каких-либо предварительных измерений. Для решения задачи необходимо задать форму контактов, внешние воздействия (ток и силу контактного нажатия) и механические, тепловые и электрические свойства материала в зависимости от температуры в том ее диапазоне, в котором ожидается нагрев.

Основным препятствием в использовании данного метода является отсутствие исчерпывающих данных о механических свойствах материала при высоких температурах, в особенности при температурах, близких к плавлению. Однако в более узком диапазоне температур, включающем температуру рекристаллизации, с его помощью могут быть получены подробные сведения о нагреве контактных окрестностей. Именно этот способ будет использован в настоящей работе.

1. Объект исследования и метод моделирования

Будем рассматривать прохождение тока через медные цилиндрические соосно расположенные контакты, соединенные одним КП круглой формы, к которым приложена внешняя сила контактного нажатия 1000 N. Такая форма пятна обеспечивается типом контактных поверхностей „плоскость—скошенный конус“, угол скоса 3° . На рис. 1, a представлена расчетная модель. Центр КП совпадает с началом координат XOY , его край расположен при $x = a(t)$. С учетом симметрии контактов задача будет решаться как двумерная осесимметричная.

На этом же рисунке приведены условия, задаваемые на поверхностях расчетной модели. Нижний торец контактов заземляется и фиксируется механически. На верхний торец задаются сила контактного нажатия и величина протекающего тока. На внешние поверхности контактов можно задать адиабатическое приближение, если длительность тока не превышает 1 s [7,8]. Также на них задается условие равенства нулю нормальной компоненты тока.

В качестве материала контактов выбрана холоднодеформированная медь технической чистоты марки М1. Механические и теплофизические свойства меди приведены в [9–13].

В расчетах будет использоваться билинейная модель σ – ε характеристики материала, качественно представленная на рис. 1, *b*. При фиксированной температуре она задается тремя параметрами — модулем Юнга E , пределом текучести σ_T и модулем упрочнения β . На рис. 1, *c* приведены зависимости от температуры модуля Юнга и предела текучести.

При увеличении температуры в окрестности 600 К предел текучести уменьшается почти в 4 раза, что соответствует резкому изменению механических свойств материала, вызванного рекристаллизацией. Эту температуру в дальнейшем будем называть температурой размягчения T_s .

На рис. 1, *d* приведено семейство билинейных σ – ε кривых, построенных при различных температурах, которые используются в дальнейших расчетах. Исследуется нагрев токами КЗ. Их форма и длительность токов определяется стандартами [7,8].

1.1. Численная схема решения

Для построения решения задач нагрева контактов импульсными токами будет применяться итерационный механизм, блок-схема которого приведена на рис. 2.

В приведенных на рис. 2 уравнениях (1)–(4) φ — электрический потенциал (расчетная величина модуля 2), j — плотность электрического тока, ρ — удельное сопротивление материала, T — температура (расчетная величина модуля 3), κ — теплопроводность, γ — объемная плотность, C_p — теплоемкость, u — перемещение (расчетная величина модуля 4), σ — механическое напряжение, F — внешняя сила.

Интервал времени от $t = 0$ до τ , для которого строится решение, разбивается на малые интервалы τ , для которых последовательно решаются три задачи: токопрохождения, теплопроводности и механическая. Каждой задаче на схеме соответствует свой модуль. Решения внутри каждого модуля осуществляются независимо от других, после чего модуль обменивается полученными данными с остальными модулями. В работе предполагается, что при достаточно малом Δt связанное последовательное решение трех задач сходится к совместному решению теплоэлектромеханической постановки. Кроме

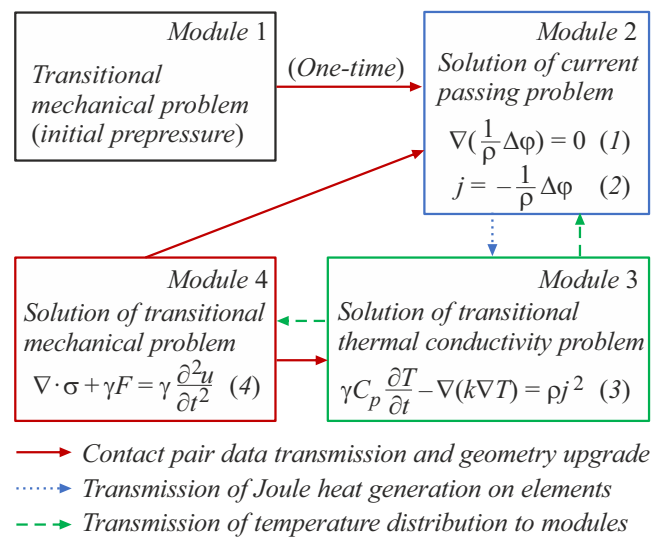


Рис. 2. Схема решения и уравнения, решаемые в модулях.

сходимости по сеточному разбиению, достигалась сходимость по временному разбиению (Δt).

Опишем ход решения подробнее. В модуле 1 решается механическая задача определения первичной контактной площадки при приложении внешней силы. Данные о контактирующих узлах и обновленной геометрии передаются в модули 3 и 2, где контактирующие узлы „склеиваются“ попарно по температуре и напряжению соответственно.

В модуле 2 решается задача токопрохождения, определяется распределение электрического потенциала и плотности тока. Полученное распределение плотности тока используется в модуле 3, где решается переходная задача теплопроводности. Затем распределение температуры в модели контактов передается в остальные модули. Далее решается механическая переходная задача (4). Данные об обновленной геометрии и контактирующих узлах передаются в модули 2 и 3. Таким образом, цикл механическая→электрическая→термическая задача замыкается. В модулях 3 и 4 решается переходная задача длительностью Δt .

Подобные итерационные схемы применялись в ряде работ [14–19]. В них решались задачи импульсного нагрева протекающим током различных токоведущих систем, содержащих контакты.

Токи короткого замыкания I_{sc} , воздействующие на замкнутые контакты, могут заметно отличаться по форме. Аварийный ток может сразу выйти на свое установившееся значение I_{sc} без возникновения каких-либо переходных процессов, либо может содержать значительную по величине аperiodическую составляющую, затухающую в течение нескольких периодов с последующим выходом на то же значение I_{sc} . Это зависит от той фазы номинального тока, в которой произошла авария. Выброс в первом полупериоде аварийного тока,

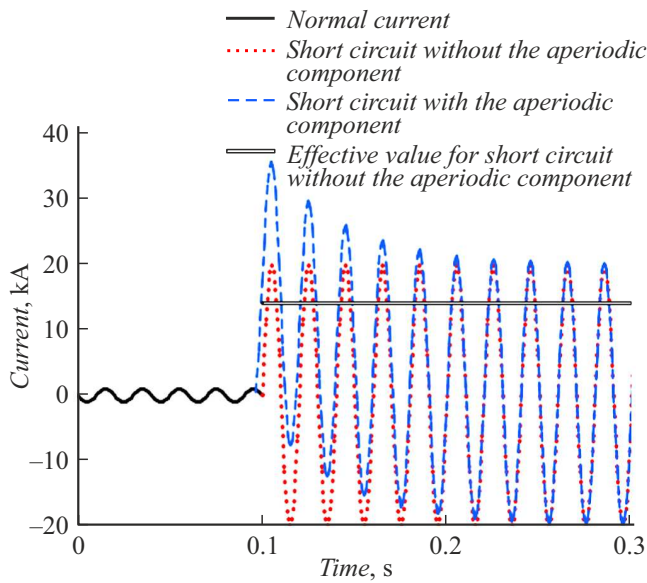


Рис. 3. Типичные осциллограммы термически эквивалентных токов КЗ.

который может почти вдвое превосходить значение I_{sc} , называется ударным током короткого замыкания.

Согласно ГОСТ [7], термическое воздействие токов короткого замыкания на токоведущие системы электрических аппаратов и их элементов, в частности электрические контакты, может быть определено для токов, независимо от их формы, если для них одинаково значение интеграла Джоуля:

$$Q = \int_{t_{cir}}^{t_{off}} I(t')^2 dt',$$

где t_{cir} и t_{off} — время начала и окончания протекания тока КЗ.

Такие токи считаются термически эквивалентными. На рис. 3 приведены три примера термически эквивалентных токов — токи короткого замыкания при наличии и отсутствии аperiodической составляющей и постоянный ток величиной, равной действующему значению I_{sc} без аperiodической составляющей. В настоящей работе будут рассмотрены результаты нагрева такими токами и проведено их сравнение.

2. Результаты численных расчетов

Рассмотрим результаты воздействия на замкнутые контакты термически эквивалентных токов различной формы и покажем, насколько может различаться их нагрев. Также проанализируем распределения температуры и механических характеристик в окрестности КП при нагреве.

Начнем со случая нагрева контактов токами короткого замыкания синусоидальной формы без аperiodической составляющей. Покажем необходимость корректного

описания изменения радиуса КП при нагреве до температуры, превышающей температуру рекристаллизации материала, которая в используемой модели материала близка к 600 К.

Полученная при решении термо-электро-механической контактной задачи кривая нагрева (зависимость максимальной температуры контакта от времени) и изменение радиуса КП представлены на рис. 4 в виде сплошных кривых.

Максимальная температура достигается к моменту времени 6 ms и превышает температуру рекристаллизации на 80 К. Радиус КП ко времени 2.7 ms, когда на пятне достигается температура T_s , возрос на 7% по сравнению с начальным значением. При дальнейшем нагреве до максимальной температуры, т.е. к моменту времени 6 ms, радиус увеличился значительно больше — еще на 60% — из-за резкого изменения предела текучести в этом диапазоне температур. Далее радиус практически не изменялся.

Покажем, что изменится в оценках нагрева, если не учитывать процесс расплывания КП или учесть его приближенно. Рассмотренный выше вариант расчета назовем базовым. Если увеличение КП не учитывать, то температура достигнет значения температуры плавления $T_m = 1356$ К уже к моменту $t = 3.2$ ms, тогда как в базовом варианте расчета ее значение составляет 680 К. При использовании приближения о мгновенном увеличении радиуса в момент достижения температуры T_s максимальный перегрев пятна (относительно начальной температуры 293 К) оказывается заниженным по сравнению с базовым случаем на 34%. Если использовать приближение линейно растущего радиуса в интервале времени от начала размягчения до момента достижения максимальной температуры, то значение перегрева окажется завышенным почти вдвое, на 96%. Все это показывает, насколько важно иметь достоверную информацию об изменении размеров пятен при импульсном нагреве.

Заметим, что расплывание пятна, вызванное рекристаллизацией материала, начинается с некоторой временной задержкой после достижения максимальной температурой значения температуры размягчения. В рассматриваемом случае она составляет приблизительно 80 μ s. Задержка несколько возрастает при наличии аperiodической составляющей в токе короткого замыкания, но не превышает значения 150 μ s.

Рассмотрим теперь механические и тепловые характеристики контактных окрестностей для несколько больших значений температуры нагрева, когда КП нагревается выше T_s многократно в течение протекания тока. В качестве токового воздействия зададим гармонический ток частотой 50 Hz амплитуды 21.2 kA, что позволяет достичь температуры 750 К на первом полупериоде. На рис. 5 приведены зависимости от времени радиуса контактного пятна и максимальной температуры для синусоидального тока и его действующего значения.

Момент начала расплывания КП виден на зависимости от времени радиуса КП и еще более отчетливо

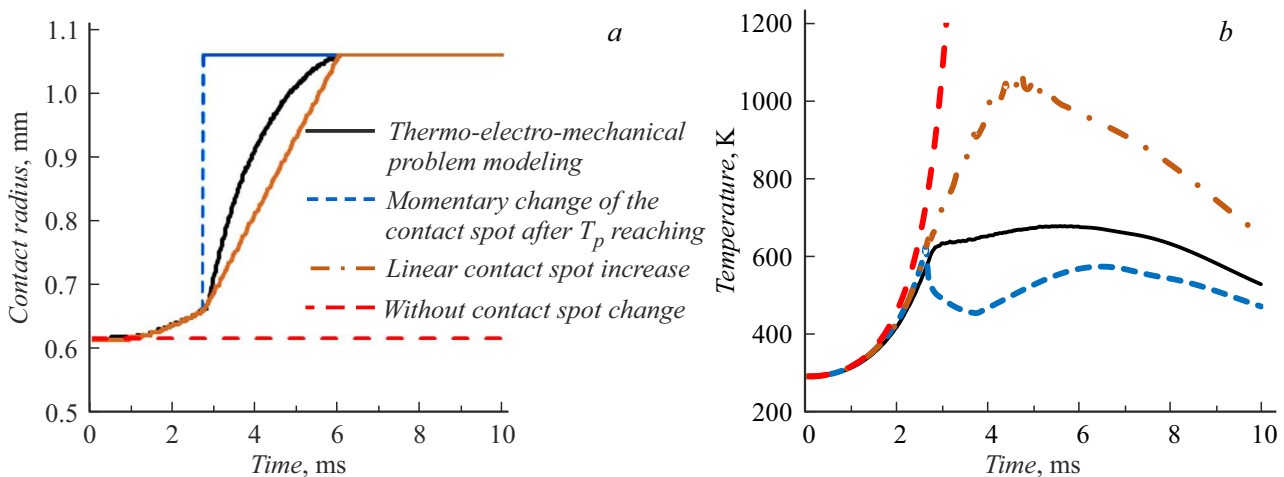


Рис. 4. Сравнение полной контактной задачи и приближений для синусоидального тока 17.5 кА. Зависимость от времени радиуса КП (а) и максимальной температуры (б).

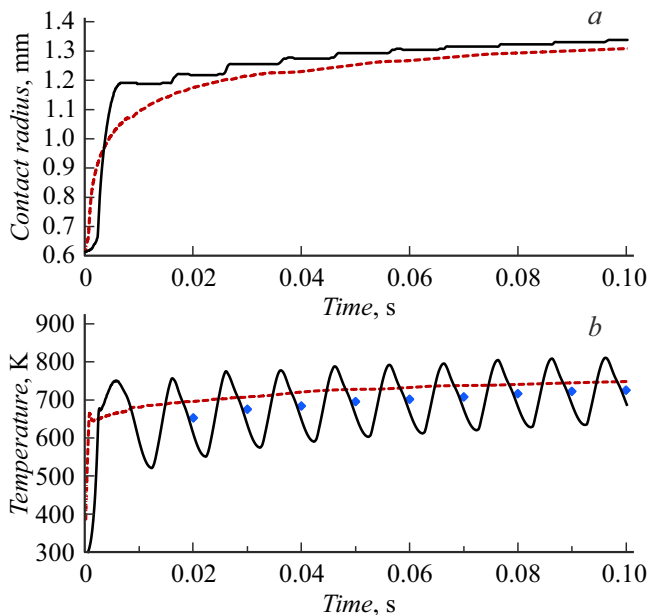


Рис. 5. Зависимость от времени радиуса КП (а) и максимальной температуры (б). Сплошные кривые — синусоидальный ток 21.2 кА, штриховые — действующее значение, точки — среднее значение для синусоидального тока на полупериоде.

на зависимости максимальной температуры. При этом температура составляет 670 К, что обусловлено упомянутой выше временной задержкой. Далее происходят квазипериодические изменения температуры относительно монотонно возрастающего среднего значения. Амплитуда колебаний температуры с течением времени уменьшается.

Расплавление пятна происходит на первом полупериоде тока. Этот процесс вызван необратимыми пластическими деформациями. Необратимость процесса подтверждается тем, что при снижении температуры ниже

температуры рекристаллизации, которое наблюдается в течение первых четырех периодов тока, заметного уменьшения радиуса пятна не происходит. Радиус незначительно уменьшается при снижении температуры из-за наличия малых областей в контактной окрестности, где материал деформирован упруго.

При нагреве термически эквивалентным постоянным током величиной, равной действующему значению для гармонического тока, процесс расплавления КП происходит гораздо раньше — приблизительно в момент времени 0.6 ms. При этом резко изменяется скорость нагрева. Значение максимальной температуры для такого токового воздействия и ее среднее значение для соответствующего гармонического тока сближаются и становятся практически неразличимыми при $t = 1$ s (характерное время для испытаний электрических аппаратов на стойкость к токам короткого замыкания [7,8]). То есть в рассмотренном случае термически эквивалентные токи дают близкие значения нагрева ко времени окончания протекания токов короткого замыкания, но динамика нагрева несколько различается.

Рассмотрим более подробно распределения температуры для одного полупериода синусоидального тока. Выберем для рассмотрения тридцатый полупериод. К этому времени тепловые процессы близки к периодическим. Температура поверхности КП и его ближайшей окрестности в любой момент этого полупериода превышает T_s . Распределение температуры приведено на рис. 6 в диапазоне от 620 К, что несколько выше T_s , до максимальной на данном полупериоде.

В течение полупериода местоположение максимальной температуры движется вдоль пятна. Это связано с двумя процессами. Первый — это выделение джоулева тепла, преимущественно на краю пятна, второй — теплоотдача во внешнюю область электродов. Оба процесса происходят непрерывно, но генерация тепла зависит от мгновенного значения тока.

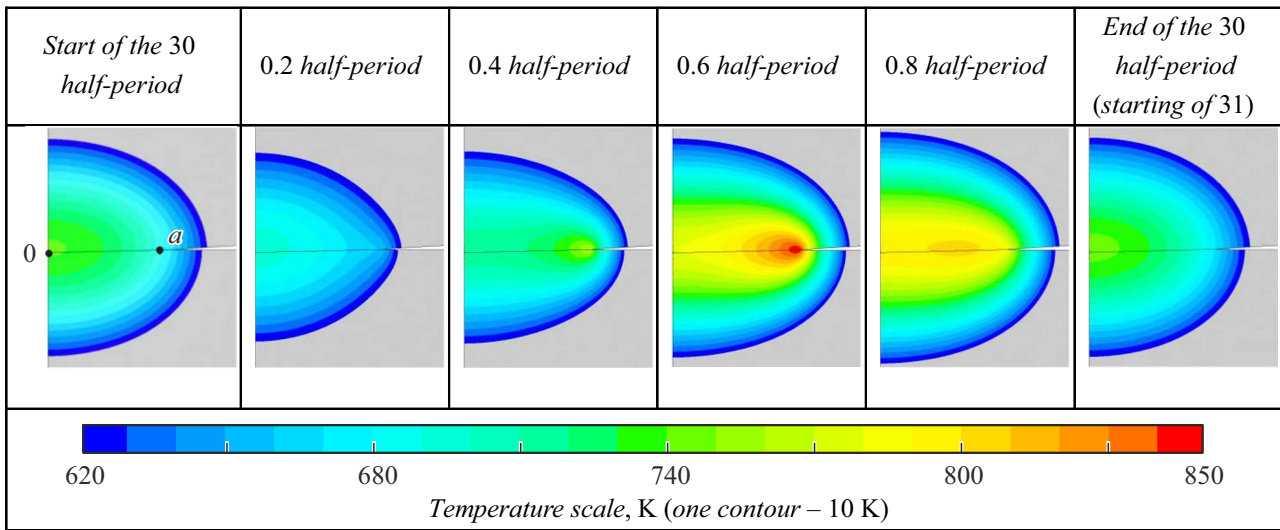


Рис. 6. Распределение температуры в разные моменты времени для одного полупериода (30-го).

С начала полупериода, когда мгновенное значение тока равно нулю, до 0.26 длительности полупериода происходит остывание контакта, так как мгновенного значения тока недостаточно, чтобы нагревать контакт. На временном промежутке 0.26–0.60 полупериода тепла выделяется больше, чем уходит во внешнюю область, поэтому окрестность края КП интенсивно нагревается. Для остальной части полупериода значение тока будет уменьшаться и контакт начнет остывать. Центр КП окружен „горячей“ медью и, как следствие, остывает дольше остальных областей. Чем ближе точка к центру пятна, тем медленнее она остывает. Из-за этих двух факторов в некоторые моменты температура распределена немонотонно вдоль поверхности контакта. Это хорошо видно на 0.8 полупериода.

Описанное выше изменение распределения температуры является характерным для любого полупериода, на котором контактная поверхность перестала ускорено увеличиваться (размягчаться).

На рис. 7 приведены совместные распределения температуры, относительных упругих и пластических деформаций в окрестности КП. В начальный момент времени эта окрестность деформирована преимущественно пластически. Но сама контактная площадка и небольшой участок вблизи нее (10% от радиуса КП) деформированы в 4 раза меньше. Упругие и пластические деформации сопоставимы.

В момент t_s начинает формироваться небольшая тороидальная область размягченной меди, где температура $T > T_s$ (на рис. 7 это хорошо видно для времени $t_s + 0.1$ ms). Из-за схожести по форме на приведенных сечениях для данной визуализации будем называть ее „каплей“. Она так же отражается и на графиках деформаций. Через 0.3 ms капля занимает уже половину линейного размера КП. Пластические деформации внутри капли на два порядка больше упругих. Спустя еще 0.1 ms

уже вся КП размягчена, и пластические деформации становятся основными на всей поверхности контакта. Вплоть до $t_s + 3.2$ ms (6 ms) капля лишь расплывается. И даже спустя десятки периодов происходит расплывание капли и, как следствие, изменение размеров области пластических деформаций. Но это уже почти не сказывается на увеличении радиуса КП.

3. Сравнение воздействия на контакты термически эквивалентных токов

Выше было отмечено, что для расчета нагрева контактов токами короткого замыкания ГОСТ [7,8] допускает использовать токи, для которых значение интеграла Джоуля одинаково. Это могут быть токи синусоидальной формы, с аperiodической составляющей, проявляющейся в течение нескольких первых периодов, и постоянный ток с величиной, равной действующему значению для гармонического тока (рис. 3).

Была решена серия задач для разных величин тока и соответственно разных уровней нагрева, на основании чего можно сделать следующий вывод. Для синусоидального тока и постоянного тока, равного его действующему значению, КП нагреваются до практически одинаковых температур как для существенного превышения температуры рекристаллизации на первом полупериоде, так и для реализаций, в которых она не была достигнута вовсе. Такой пример был приведен на рис. 5.

Ситуация может существенно измениться, если величина синусоидального тока короткого замыкания такова, что в течение первого полупериода достигается температура, близкая к температуре T_s , например, лежит в диапазоне 550–600 K. В этом случае размягчения не происходит, так же как и для соответствующего постоянного тока. Но ток с аperiodической составляющей, который в первом максимуме имеет гораздо большее значение,

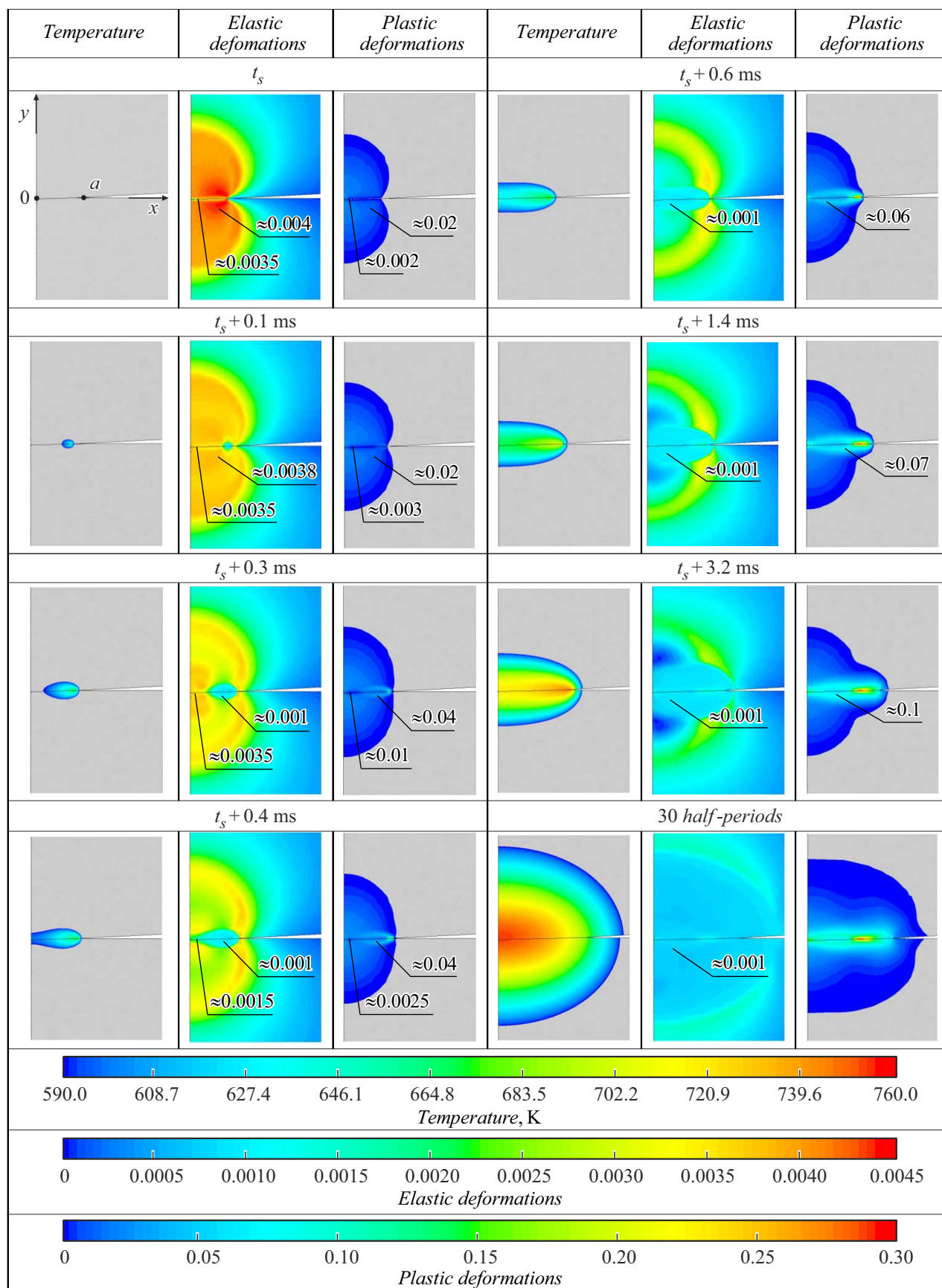


Рис. 7. Распределение температуры, относительных упругих и пластических деформаций.

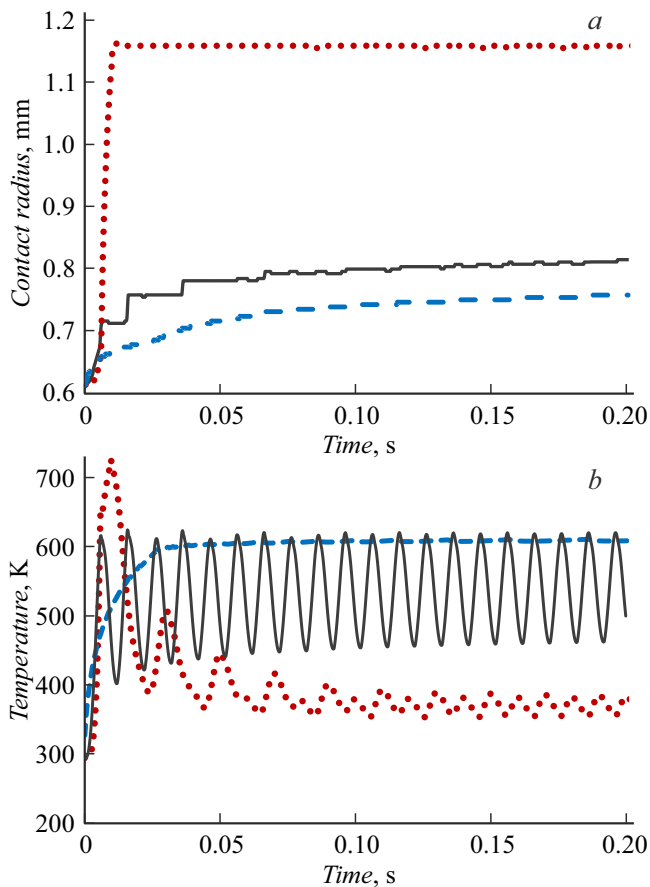


Рис. 8. График радиус КП (а), максимальная температура электрода (b) (черным — синусоидальный ток 10.6 кА, штриховая — действующее значение, пунктиром — ударный ток).

может вызвать размягчение материала и, как следствие, изменение КП. Это означает, что в дальнейшем ток короткого замыкания с апериодической составляющей будет протекать через контакты при существенно меньшем значении величины контактного сопротивления, чем для термически эквивалентных токов другой формы.

Такой пример приведен на рис. 8. Через контакты протекает ток короткого замыкания, установившееся значение которого составляет 10.6 кА. Максимальная температура в течение первого и последующих полупериодов практически совпадает с T_s , что не вызывает рекристаллизации, и расплывания пятна не происходит — радиус увеличивается на 33% по сравнению с первоначальным. Примерно также изменяется радиус для воздействия эффективным постоянным током. Среднее по периоду значение температуры для синусоидального тока отличается от нагрева действующим значением постоянного тока на 30%.

Для тока с апериодической составляющей нагрев происходит принципиально иначе. В момент $t = 6$ ms начинается резкий рост радиуса КП, через 4 ms его значение увеличивается почти вдвое по сравнению с начальным радиусом и в дальнейшем практически не

изменяется. Это приблизительно вдвое уменьшает величину контактного сопротивления. Величина нагрева КП (превышение средней температуры над ее начальным значением 293 К) уменьшается в 6 раз по сравнению с его пиковым значением на первом полупериоде тока.

После протекания 10 периодов тока величина среднего значения перегрева КП для синусоидального тока составляет 260 К, для постоянного тока — 310 К, а для тока с апериодической составляющей — почти в 4 раза меньше, всего 80 К. Этот пример наглядно демонстрирует возможность неприемлемо больших ошибок в результатах расчета нагрева контактов токами короткого замыкания при использовании понятия термически эквивалентных токов.

Заключение

В работе методом прямого численного моделирования проведено исследование динамики нагрева окрестности КП токами короткого замыкания длительностью в десятки периодов. Получены распределения температурных и механических полей в течение всего процесса нагрева. Данные расчетов позволили сделать конкретные оценки изменения параметров контактов, вызванных токами КЗ. В частности, показано, что широко используемое понятие термически эквивалентных токов может оказаться некорректным при расчете нагрева.

При определенных условиях перегрев КП для термически эквивалентных токов разной формы может кратно различаться. Условие равенства интеграла Джоуля для разных по форме токов не является достаточным для эквивалентности нагрева. Кроме этого условия, нужно, чтобы термически эквивалентные токи протекали через контакты с одинаковыми величинами контактного сопротивления.

Для разных этапов нагрева построены и описаны температурные поля, отвечающие за деформацию контактных окрестностей. Показано, как происходит изменение упруго и пластически деформируемых областей на начальном этапе нагрева.

Проведена оценка инерционности изменения размеров КП при превышении температуры рекристаллизации. Время между достижением температуры рекристаллизации и началом ускоренных деформаций на два порядка меньше периода тока промышленной частоты.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] T. Israel, S. Schlegel, S. Grossmann, T. Kufner, G. Freudiger. IEEE Holm Conf. Electr. Contacts, 254 (2018). DOI: 10.1109/HOLM.2018.8611641

- [2] T. Israel, M. Gatzsche, S. Schlegel, S. Großmann, T. Kufner, G. Freudiger. IEEE Holm Conf. Electr. Contacts. 40 (2017). DOI: 10.1109/HOLM.2017.8088061
- [3] M. Gatzsche, N. Luecke, S. Großmann, T. Kufner, G. Freudiger. Transactions on CPMT, 7 (3), 317 (2017).
- [4] Р. Хольм. *Электрические контакты* (ИЛ, М., 1961)
- [5] О.М. Павлейно. *Физические особенности нагрева сильноточных электрических контактов* (Дис. канд. техн. наук., СПб, 2015)
- [6] М.А. Павлейно, О.М. Павлейно, М.С. Сафонов. ЖТФ, **91** (1), 110 (2021). DOI: 10.21883/JTF.2021.01.50281.148-20 [M.A. Pavleino, O.M. Pavleino, M.S. Safonov. Tech. Phys., 66 (1), 103 (2021). DOI: 10.1134/S1063784221010163]
- [7] ГОСТ Р 52736–2007 *Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета электродинамического и термического действия тока короткого замыкания* (Стандартинформ, М., 2007)
- [8] ГОСТ 26522-85 *Короткие замыкания в электроустановках* (Стандартинформ, М., 2007)
- [9] О.Е. Осинцев, В.Н. Федоров. *Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки* (Машиностроение, М., 2004)
- [10] G.K. White, R.B. Roberts, High Temperatures-High Pressures, 12, 311 (1980).
- [11] R.A. Matula, J. Phys. Chem. Ref. Data, 8 (4), 1147 (1979). DOI: 10.1063/1.555614
- [12] N.J. Simon, E.S. Drexler, R.P. Reed, NIST Monograph 177, *Properties of Copper and Copper Alloys at Cryogenic Temperatures* (1992)
- [13] А.П. Смирягин. *Промышленные цветные металлы и сплавы* (Металлургиздат, М., 1956)
- [14] П.А. Борисенко, О.М. Павлейно, М.А. Павлейно, А.А. Статуя. *Методы численного решения нелинейных нестационарных термо-электро-механических контактных задач* (МРЕЕЛ, СПб., 2009), с. 287–291.
- [15] Z. Tiansheng, L. Hongwu, Y. Nairui, G. Ruiliang, J. Shenlim. ICEMPE (Matsue, Japan, 2013)
- [16] F. Shen, L.-L. Ke. Metals, **11** (6), 955 (2021).
- [17] S. Rothe. *Doctoral Thesis Electro-Thermo-Mechanical Modeling of Field Assisted Sintering Technology: Experiments* (Clausthal-Zellerfeld, Clausthal University of Technology, 2014)
- [18] X. Guan, N. Shu, B. Kang, M. Zou. IEEE T-CPMT, **5** (3), 320 (2015)
- [19] H. Liu, D. Leray, P. Pons, S. Colin. *Finite Element Multi-Physics Modeling for Ohmic Contact of Microswitches*. (EuroSimE, 680, Ghent, Belgium, 2014)