

Нагрев силовых электрических контактов ударными токами короткого замыкания

А. М. Чалый^а, В. А. Дмитриев^а, М. А. Павлейно^б, О. М. Павлейно^б

^аПромышленная группа «Таврида Электрик»,
5-я ул. Ямского Поля, д. 5, стр. 1 Бизнес-центр "Solutions", 18 этаж, г. Москва, 125040, Россия

^бСанкт-Петербургский государственный университет,
Научно-образовательный центр «Электрофизика» физического факультета,
ул. Ульяновская, д. 3, г. Санкт-Петербург, Петродворец, 198504, Россия, e-mail: pavleyno@mail.ru

Проведены экспериментальное исследование и численное моделирование процесса нагрева силовых электрических контактов ударными токами в широком диапазоне температур, вплоть до температуры плавления. Обнаружено, что сварка электродов начинается при температурах, существенно меньших, чем температура плавления материала. Выявлены особенности процессов размягчения и плавления контактной области.

Ключевые слова: силовые электрические контакты, контактная область, температура плавления, сварка электродов, процесс размягчения материала.

УДК 621.3.066

ВВЕДЕНИЕ

Силовые контакты высоковольтного коммутационного оборудования в процессе эксплуатации периодически подвергаются воздействию токов, существенно превосходящих номинальные значения, длительность которых сравнима с периодом тока промышленной частоты. Это происходит, например, при протекании через них токов короткого замыкания, пусковых токов мощных электродвигателей и т.д. Такие воздействия могут вызывать значительный нагрев контактов, вплоть до их плавления и возникновения фатальной сварки. С этой точки зрения изучение физических процессов, сопровождающих импульсный нагрев контактов, представляет значительный практический интерес.

Возможности аналитического решения подобных задач ограничены необходимостью учитывать нелинейные свойства материалов. Здесь проявляются нелинейности двух типов. Во-первых, в силу того, что речь идет о нагреве в широком диапазоне температур, нужно учитывать зависимость от температуры электрических, тепловых и механических свойств материала. Во-вторых, для силовых контактов характерны такие величины контактного нажатия, которые приводят к тому, что значительная часть контактной области деформирована пластически.

На пути численного решения задач импульсного нагрева электрических контактов также возникает ряд трудностей. Так, при малых длительностях нагрева, сравнимых с периодом

промышленной частоты, в контактной области возникают значительные градиенты температур [1, 2] и, как следствие, существенные градиенты механических свойств материала. Поэтому добиться сходимости решения стандартными методами при температурах, превышающих температуру размягчения, удается далеко не всегда. Однако данное ограничение не является принципиальным, и может быть устранено применением численных алгоритмов, использующих процедуру построения адаптивных сеток улучшенного качества в областях с большими градиентами.

Более существенным является следующее обстоятельство. Температура контактной области сильно зависит от площади контактных пятен. В [2] было показано, что при определенных параметрах контактов и режимах нагрева ошибка в определении радиуса контактного пятна всего на 10–15% может стать причиной неточности определения температуры в несколько сотен градусов, что является недопустимым с точки зрения выполнения практически значимых расчетов. Гарантировать же более высокую точность результатов численного решения механических контактных задач едва ли возможно, учитывая, что достоверные данные о механических свойствах материалов контактов в широком диапазоне температур зачастую просто отсутствуют, особенно для сплавов и композитных материалов.

Все это повышает значимость экспериментальных исследований, направленных на выявление основных особенностей нагрева электрических контактов. Отметим, что в литературе

достаточно широко представлены результаты экспериментов по нагреву контактов номинальными токами и токами термической стойкости. Что же касается импульсного нагрева сильноточных контактов ударными токами миллисекундной длительности, можно утверждать, что этот вопрос изучен к настоящему времени явно недостаточно.

При изучении процесса импульсного нагрева контактов ударными токами наиболее интересными представляются вопросы, связанные со сваркой контактов, их плавлением, размягчением контактной области, изменением переходного сопротивления при нагреве. На выявление особенностей протекания этих процессов и нацелена данная работа.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Исследуемыми образцами служили массивные медные электроды цилиндрической формы, их радиус и высота значительно превосходили размеры контактных пятен. Выбор материала был продиктован следующими соображениями. Во-первых, медь является одним из наиболее распространенных материалов, из которых изготавливаются сильноточные контакты. Во-вторых, свойства этого материала достаточно хорошо известны, что принципиально важно при проведении численных расчетов, сопровождавших экспериментальные исследования.

На контактирующие торцевые поверхности электродов наносилось серебряное покрытие, толщина которого не превосходила десятка микрон, что позволило, не изменяя условия токопрохождения в самих электродах, избежать заметного влияния слабо проводящих пленок.

Один из электродов имел плоскую торцевую поверхность, другой – форму скошенного цилиндра или сегмента сферы. Это обеспечивало одноточечное контактирование с практически круглой формой контактного пятна.

Блок-схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Источником энергии выступает батарея конденсаторов большой емкости, в цепи разряда которой последовательно с безындуктивным шунтом находятся исследуемые электроды. Данная система представляет собой колебательный контур малой добротности, генерирующий квазигармонический сигнал с частотой около 50 Гц, затухающий в течение нескольких периодов. Контур имеет возможность генерировать импульс тока с амплитудой в первой полуволне до 100 кА.

Измерения проводились в следующей последовательности. Электроды устанавливались на испытательном поле. К ним прикладывалась внешняя сила контактного нажатия $F_{кн}$, величина которой контролировалась с помощью датчика усилия. Величина силы контактного нажатия варьировалась от 100 до 2500 Н. Через электроды пропусклся импульс ударного тока. В автоматическом режиме записывались осциллограммы тока и напряжения на электродах. До и после пропускания тока измерялась величина контактного сопротивления R_c . После пропускания тока электроды размыкались, в случае возникновения сварки определялась сила, необходимая для ее отрыва $F_{отр}$. После этого производилось фотографирование контактной области.

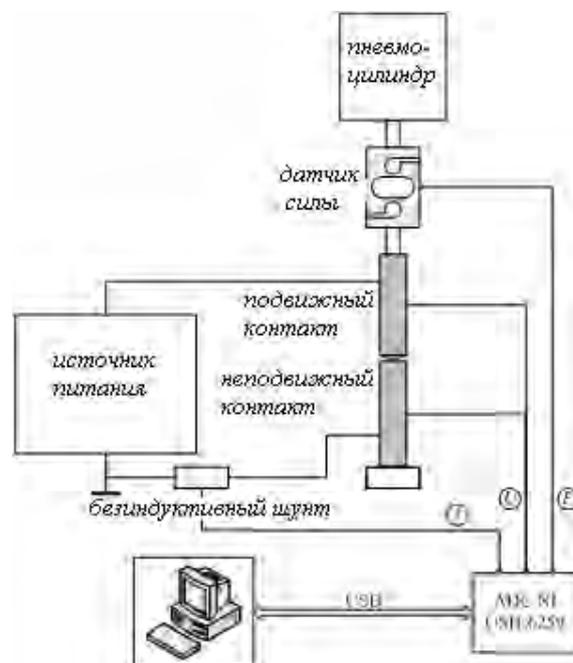


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки.

На рис. 2 и 3 приведены осциллограммы тока $I(t)$ и контактного напряжения $U_c(t)$, соответствующие контактному нажатию 1000 Н, при пропускании различного по величине тока (17,5 и 40 кА), а также соответствующие микрофотографии контактной области. Под величиной ударного тока будем понимать его максимальное значение в первом полупериоде.

В первом случае протекание ударного тока привело к возникновению незначительной сварки. Ее следы видны на микрофотографии вблизи границы контактного пятна. При прохождении тока 40 кА наблюдается сваривание практически всей поверхности контакта.

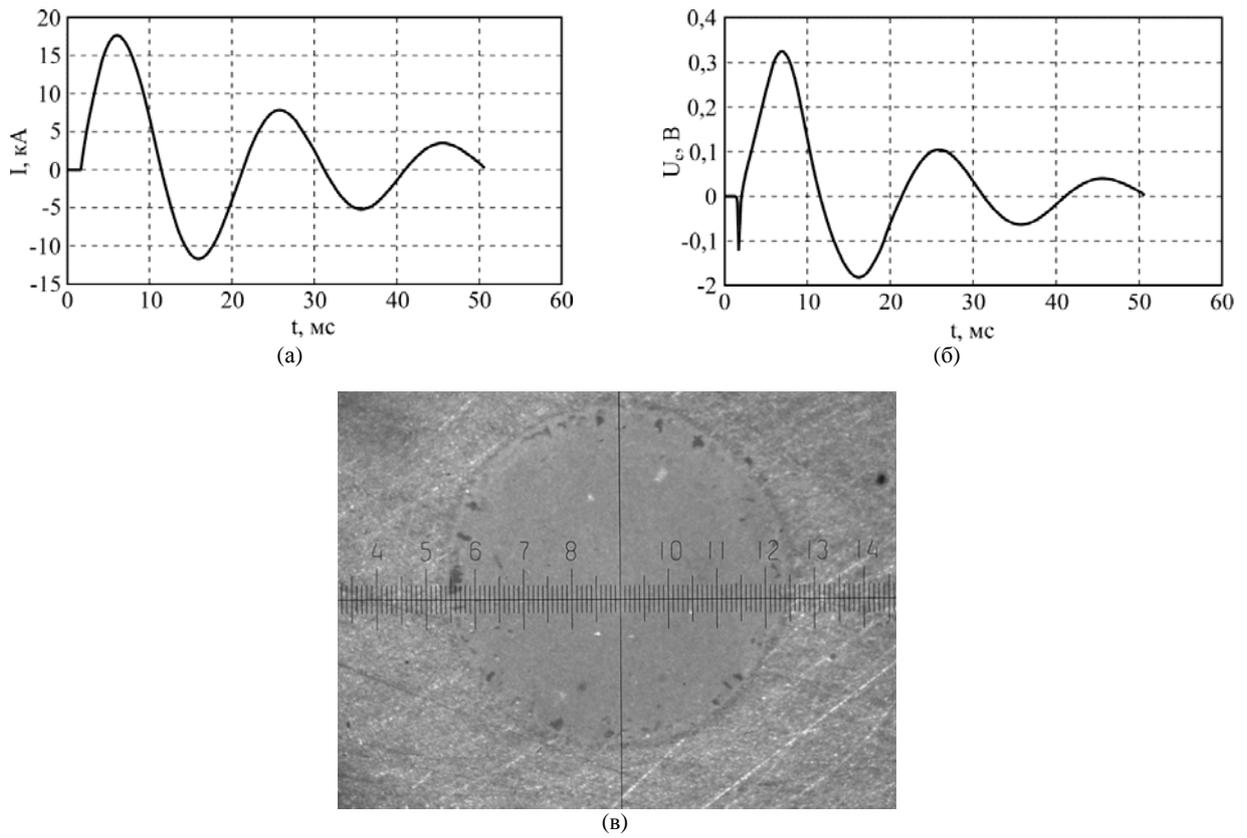


Рис. 2. Осциллограммы тока (а) и напряжения (б); фотография контактной области (в) при нагреве током 17,5 кА.

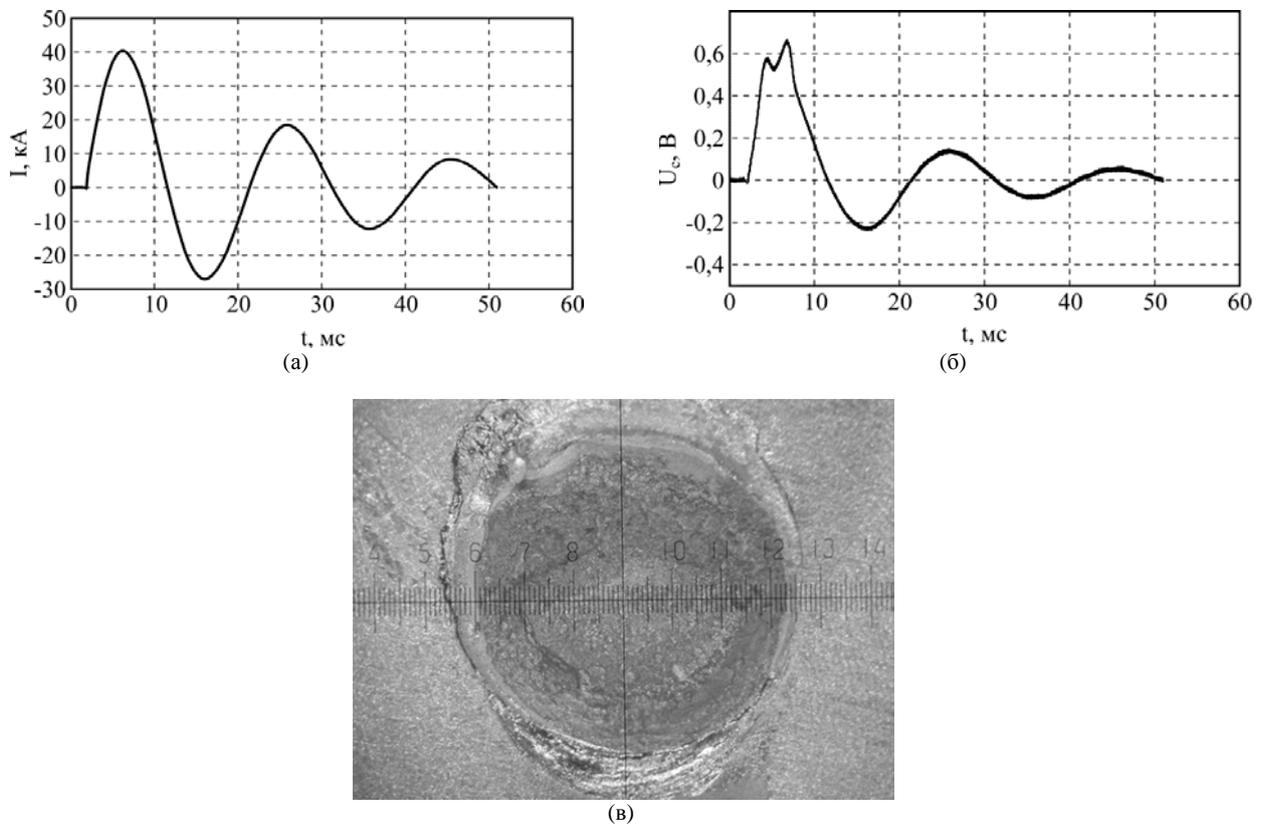


Рис. 3. Осциллограммы тока (а) и напряжения (б); фотография контактной области (в) при нагреве током 40 кА.

Располагая подобными данными, можно сделать вывод о наличии или отсутствии сварки электродов при пропускании ударного тока. В то же время определить температуру контактов, при которой произошла сварка, непосредственно по величине контактного напряжения, как делают в случае стационарного нагрева [3, 4], при импульсных токовых воздействиях не удастся.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для определения динамики нагрева электродов ударными токами можно воспользоваться методикой численных расчетов, предложенной в [1]. Расчеты проводятся в следующей последовательности. По измеренной до пропускания тока величине контактного сопротивления рассчитывается начальное значение радиуса контактного пятна. Далее решается задача нестационарного нагрева электродов током известной величины $I(t)$. Решение проводится итерационно: на каждом шаге по времени задается ток и подбирается такое значение радиуса контактного пятна a , которое обеспечивает достаточную близость расчетного значения напряжения на электродах к экспериментально измеренному. То есть подбором функции $a(t)$ мы приближаем расчетную кривую $U_c(t)$ к реальной осциллограмме напряжения. Учитывается зависимость от температуры теплоемкости, теплопроводности, плотности и удельного сопротивления материала. При этом в каждый момент времени мы знаем распределение температуры и потенциала в контактной области, а следовательно, и распределение тепловых потоков, напряженности электрического поля, плотности тока и ряда других величин.

Предложенный метод не считается универсальным для расчета импульсного нагрева электродов. Он опирается на имеющиеся экспериментальные данные и в этом смысле не является автономным. Но при этом он предоставляет широкие возможности для исследования физических процессов, сопровождающих импульсный нагрев. Принципиально важным является отсутствие необходимости решения механической части задачи для определения размеров контактного пятна, что позволяет обойти трудности, связанные с возможным отсутствием исчерпывающих данных о механических свойствах материалов в широком диапазоне температур.

Проведем расчет нагрева контактов током 17,5 кА. На рис. 4а приведена кривая $a(t)$, обеспечивающая близость экспериментальной и расчетной зависимостей от времени контактного

напряжения (рис. 4б). Экспериментальная кривая $U_c(t)$ приведена не с момента включения тока, так как вначале присутствуют коммутационные помехи, искажающие реальную осциллограмму.

Значение радиуса контактного пятна, равное начальному радиусу, определенному по измеренной величине контактного сопротивления до пропускания тока, дает хорошее совпадение измеренной и расчетной зависимостей $U_c(t)$ до тех пор, пока максимальная температура не приблизится к значению 600 К, что соответствует температуре размягчения меди. Аналогичные результаты были получены для всех испытанных электродов. Это дает основание полагать, что в процессе нагрева контактов ударным током до температуры размягчения радиус контактного пятна изменяется незначительно.

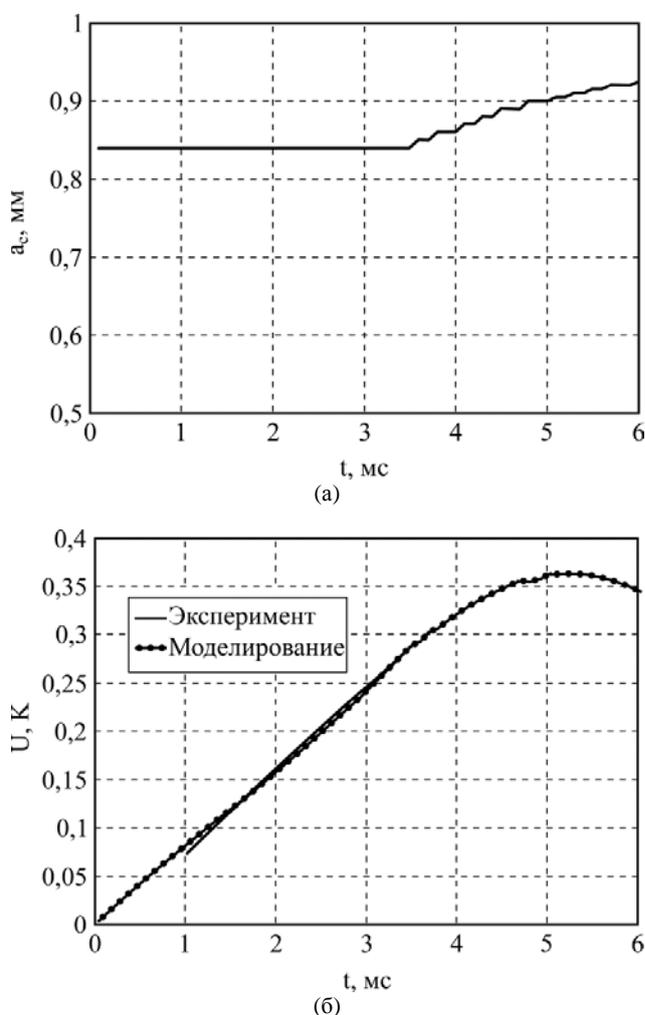


Рис. 4. Зависимость радиуса контактного пятна (а) и напряжения (б) от времени, $I = 17,5$ кА.

Рост максимальной температуры в области контакта описывает кривая рис. 5.

При токе $I = 17,5$ кА была зафиксирована сварка, сила отрыва которой составила 32 Н. При этом максимальная температура контактной области была равна 860 К, то есть плавление достигнуто не было. Косвенным подтверждением отсутствия плавления служит то обстоятельство, что на осциллограмме напряжения нет особой точки, напряжение «плавно» изменяется вслед за изменением тока, в то время как при больших значениях тока особая точка на осциллограмме явно наблюдается (см. рис. 3б). Кроме того, максимальное значение контактного напряжения в рассматриваемом случае составляет 0,32 В, что значительно ниже напряжения плавления меди 0,43 В при пропускании постоянного тока.

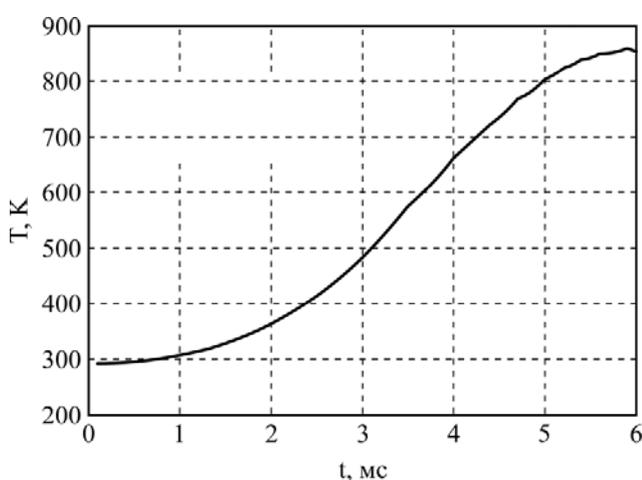


Рис. 5. Изменение во времени максимальной температуры контактного пятна, $I = 17,5$ кА.

Из этого можно заключить, что сварка контактов ударным током начинается задолго до достижения в контактной области температуры плавления материала. Следовательно, она связана не с плавлением, а вызвана другими причинами. Наиболее вероятным механизмом начального сваривания контактов является механизм диффузионной сварки. Обобщая результаты, полученные для электродов различной формы в диапазоне сил контактного нажатия от 100 до 2500 Н, можно заключить, что заметное сваривание контактов (с силой отрыва порядка 10 Н) начинает происходить при температуре контактного пятна около 800 К.

Приведем результаты аналогичных расчетов для тока $I = 40$ кА. Этому току соответствует сварка с силой отрыва более 3000 Н. Это так называемая фатальная сварка, которую приводы коммутационных аппаратов разорвать бы не смогли. На рис. 6 приведены графики, отражающие зависимость радиуса контактного пятна от

времени и рост максимальной температуры в области контакта.

Радиус контактного пятна, как и в предыдущем случае, можно считать неизменным при нагреве до температуры размягчения материала. Температура контакта к моменту $t = 2,3$ мс достигает температуры плавления меди. В этот же момент на осциллограмме наблюдается изменение характера кривой $U_c(t)$, связанное с началом плавления. Следы расплавленной меди отчетливо видны на микрофотографии (см. рис. 3в).

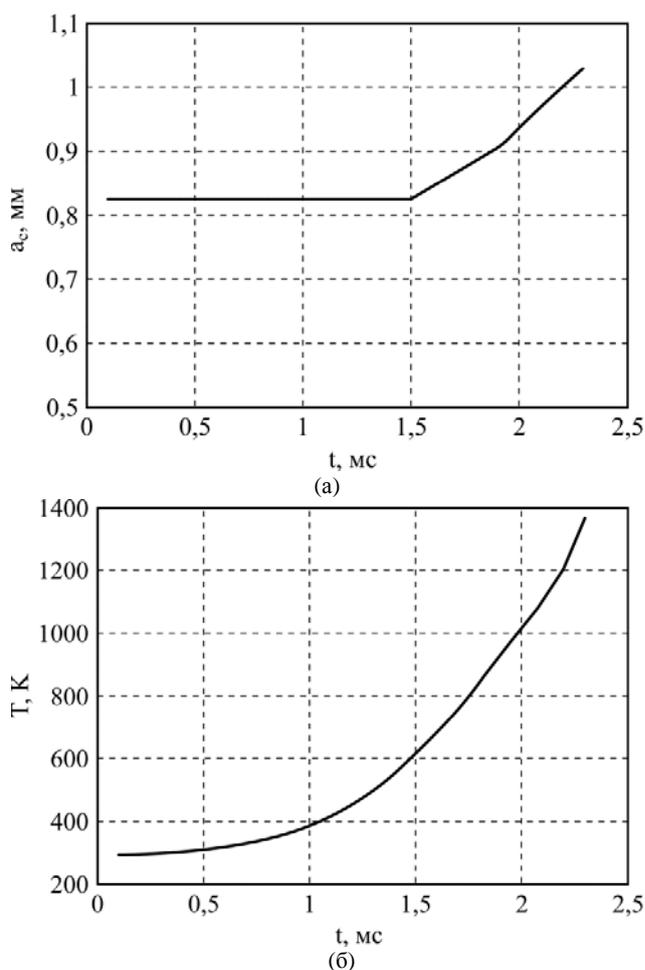


Рис. 6. Зависимость радиуса контактного пятна (а) и максимальной температуры (б) от времени, $I = 40$ кА.

Имея возможность рассчитывать распределение температуры в электродах при их нагреве ударным током, мы можем детально проследить за изменением во времени механических характеристик контактной области, в частности, описать процесс размягчения материала контактов, сделать некоторые выводы о том, как протекает процесс плавления. Эти результаты интересны как с точки зрения исследования эффектов, сопровождающих импульсный нагрев, так и с практической точки

зрения. Имеется в виду, что и размягчение, и плавление приводят к изменению величины контактного сопротивления.

Опишем процесс размягчения материала электрода в области контактного пятна на рассмотренном выше примере прохождения импульса тока величиной 40 кА через систему электродов типа конус–плоскость при силе поджатия 1000 Н. На рис. 7 приведен фрагмент одного из электродов, содержащий область контактного пятна. Начало системы координат совпадает с центром контактного пятна, ось OX проходит по поверхности пятна, OY соответствует оси симметрии электродов. Точкой O' на OX обозначен край контактного пятна до начала нагрева. Белый цвет соответствует неразмягченной меди, серый – размягченной (нагретой свыше 600 К).

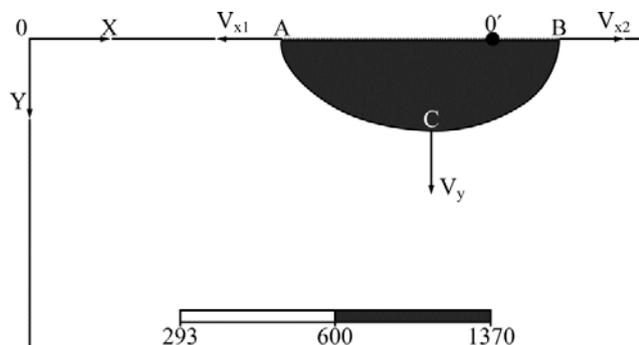


Рис. 7. Движение фронта размягчения материала в области контактного пятна.

На рис. 8 приведены распределения для трех моментов времени: начало размягчения, момент, когда приблизительно половина контактного пятна размягчена, и момент, когда все контактное пятно размягчено. Сначала область размягченной меди расположена в узком кольце на границе контактного пятна. С течением времени это кольцо расширяется, причем расширение происходит преимущественно в глубь контактного пятна. Полностью контактное пятно размягчается в данном случае приблизительно за 0,5 мс.

Проанализируем подробнее, как перемещается граница размягчения материала внутрь контактного пятна, наружу от пятна к краю электрода и в глубь электрода вдоль оси OY (рис. 7). Соответствующие скорости обозначим V_{x1} , V_{x2} и V_y . Зависимости от времени указанных скоростей приведены на рис. 9. Скорость движения фронта размягчения к центру пятна всегда больше, чем наружу пятна и в глубь электродов (за исключением начального момента времени). Причем эта разница скоростей возрастает, и к моменту, когда

все контактное пятно оказывается размягченным, отношение скоростей превышает 9 раз. При этом фронт размягчения распространяется наружу контактного пятна и в глубь электрода примерно с одинаковой скоростью.

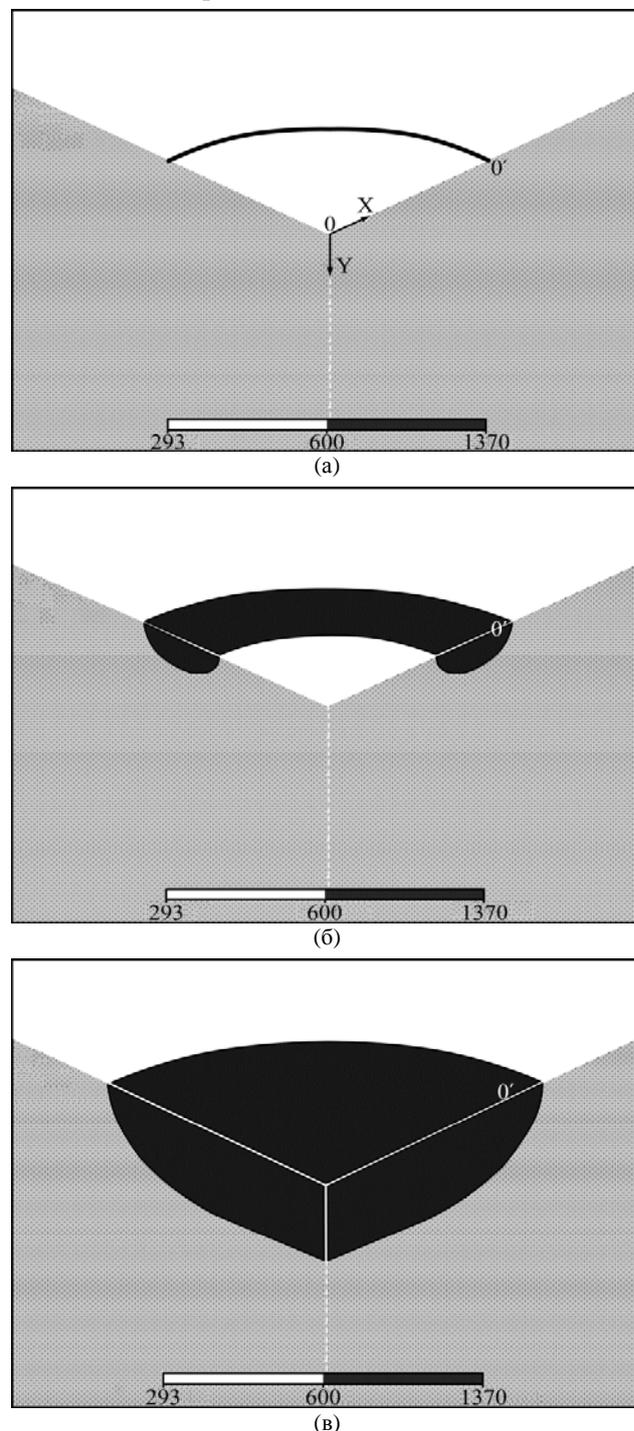


Рис. 8. Движение фронта размягчения материала в области контактного пятна.

Рассмотрим динамику плавления контактной области. На рис. 10 представлено распределение

изотерм с шагом 100° в момент начала плавления. Все изотермы существенно вытянуты к центру контактного пятна. Область, в которой медь нагрета практически до температуры плавления, располагается на границе пятна. Область «холодной», неразмягченной меди обозначена белым цветом. Она практически вплотную примыкает к границе контактного пятна. При отходе от этой границы наружу всего на 0,2 радиуса пятна температура падает в 2 раза. Такой огромный градиент температуры является препятствием для последующего движения зоны расплава меди наружу. Можно предположить, что после нагрева контактной области до температуры плавления граница расплавленной области сначала будет распространяться преимущественно к центру пятна.

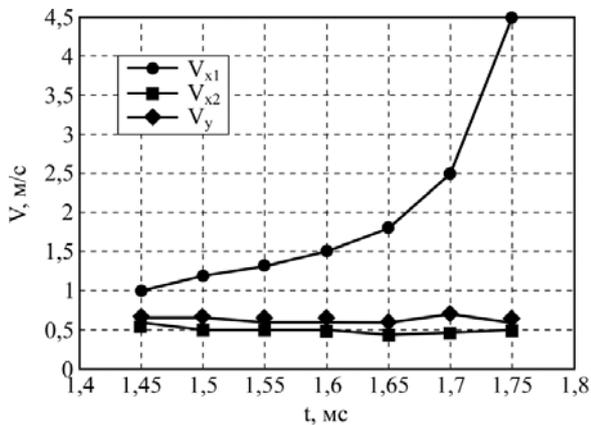


Рис. 9. Зависимость от времени скорости продвижения фронта размягчения к центру контактного пятна, наружу пятна и в глубину электрода.

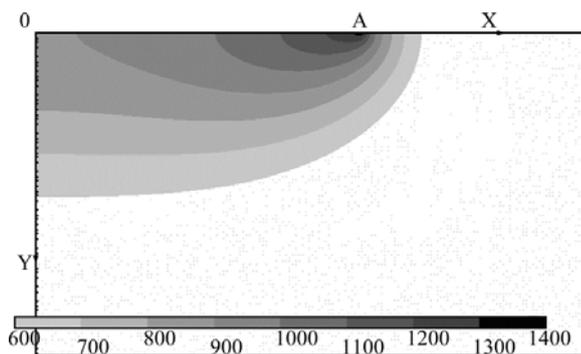


Рис. 10. Распределение изотерм в окрестности контактного пятна в момент начала плавления.

Обоснуем сделанное предположение исходя из экспериментальных данных. На рис. 11 приведена микрофотография контактной области, соответствующая протеканию такого тока (тока плавления), который вызывает лишь незначительное

плавление. Вертикальными линиями обозначена граница контактного пятна в момент начала плавления, определенная в результате численных расчетов. Зона расплава не выходит за указанные границы. Плавление начинается на внешней границе контактного пятна, затем область расплавленной меди заполняет его внутреннюю часть.

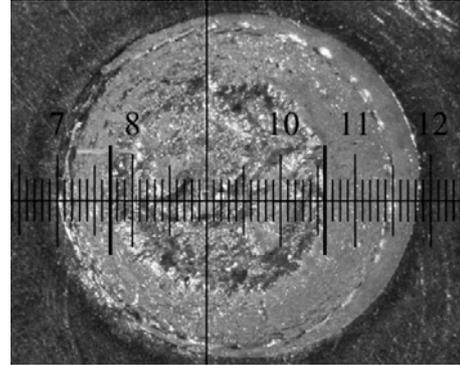


Рис. 11. Начальная стадия плавления контактного пятна.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате экспериментального исследования протекания ударных токов короткого замыкания через электрические контакты и последующего численного моделирования можно сделать следующие выводы.

1. Радиус контактного пятна остается практически неизменным при нагреве контактной области до температуры размягчения материала электродов. При дальнейшем нагреве наблюдается увеличение радиуса контактного пятна, вызванное размягчением материала контактов. Граница фронта размягчения перемещается со скоростью порядка единиц м/с.

2. Сварка электродов, изготовленных из меди, начинает происходить при токах, вызывающих нагрев контактных пятен до температуры около 800 К. Такие сварки не являются фатальными и могут быть разорваны приводами коммутационных аппаратов.

3. Протекание токов, нагревающих контактную область до температуры плавления, может приводить к фатальным сваркам электрических контактов. Превышение ударными токами значения тока плавления недопустимо с точки зрения обеспечения стойкости электрических контактов к ударному току.

4. Снизить вероятность фатального сваривания контактов можно, применяя конструкции, реализующие многоточечный контакт для распараллеливания тока между точками контакта, а также путем увеличения силы контактного нажатия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Chaly A., Dmitriev V., Pavleyno M., Pavleyno O. Experimental Research and Computer Simulation Process of Pulse Heating High Current Contacts of Vacuum Interrupters. *International Symposium on Dis-charges and Electrical Insulation in Vacuum 2010*, Braunschweig, Germany, 2010, **2**, 418–423.
2. Pavleino O.M., Pavlov V.A., Pavleino M.A. Effect of the Spreading of the Contact Spot on the Pulsed Heating of Electrodes. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2011, **47**(4), 362–369.
3. Хольм Р. *Электрические контакты*. М.: Иностранная литература, 1961. 464 с.
4. Milenko Braunovic, Valery V. Konchits, Nikolai K. Myshkin. *Electrical Contacts: Fundamentals, Applications and Technology*. Taylor & Francis Group, New York, 2006, 495 p.

Поступила 14.09.12

После доработки 27.09.12

Summary

The article deals with experimental research and numerical simulation of pulse heating of high-current electrical contacts in a wide temperature range – up to the melting point. It has been found out that electrode welding begins when the temperature is much lower than the melting point. Peculiarities of softening and melting processes of the contact area are described.

Keywords: high-current electrical contacts, contact area, melting point, electrode welding, softening process.