

## Метод оценки тока начального сваривания замкнутых сильноточных контактов при импульсном нагреве

© Тосио Наганава, М.А. Павлейно, О.М. Павлейно, М.С. Сафонов

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

Поступило в Редакцию 14 июня 2022 г.

В окончательной редакции 9 июля 2022 г.

Принято к публикации 10 июля 2022 г.

Проведено исследование процесса размягчения контактных пятен замкнутых сильноточных медных контактов, вызванного рекристаллизацией материала при протекании ударных токов короткого замыкания. Разработан не требующий предварительных экспериментальных измерений оригинальный метод расчета величины импульсного тока, инициирующего сваривание контактов.

**Ключевые слова:** электрический контакт, импульсный нагрев, численное моделирование, сварка.

DOI: 10.21883/JTF.2022.10.53253.155-22

### Введение

Сильноточные контакты в процессе эксплуатации подвергаются воздействию стационарных и импульсных токов, вызывающих их нагрев. Наибольшая температура достигается в окрестности контактных пятен (КП), где плотность тока максимальна, и происходит дополнительное выделение тепла по сравнению с другими частями токоведущих систем. Можно выделить несколько уровней нагрева, которые оказывают существенное влияние на параметры контактов и их эксплуатационные свойства: нагрев до температуры размягчения материала контактов  $T_s$ , температуры начала их сваривания  $T_w$  и температуры плавления  $T_m$ .

При достижении температуры размягчения начинается процесс рекристаллизации материала контактов, их механические свойства заметно изменяются. Это приводит к тому, что размеры контактных пятен возрастают, величина контактного сопротивления — одной из основных характеристик контактов — уменьшается, снижая дополнительное тепловыделение. Это явление необходимо учитывать при проектировании сильноточных контактов.

Рекристаллизация вызывает изменение размера пятен довольно быстро, в течение единиц миллисекунд [1], поэтому этот эффект необходимо учитывать даже при таких кратковременных токовых воздействиях, как ударные токи короткого замыкания (КЗ), протекание которых вызывает максимальный нагрев контактных пятен за время порядка 10 ns.

Другим эффектом, оказывающим заметное влияние на работу сильноточных контактов, является диффузионный перенос материала в местах контактирования. Процесс диффузии происходит даже в случае холодных контактов. В [2] и последующих работах указывается на возникновение так называемого прилипания контактов,

если контактные пятна деформированы пластически. Заметим, что в сильноточных контактах пластические деформации присутствуют практически всегда. Прилипание контактов не оказывает сколько-нибудь заметного влияния на их работу.

Диффузионные процессы в сильной степени зависят от температуры. Начиная с некоторого ее значения  $T_w$ , наблюдается резкий рост интенсивности сваривания контактов. Можно считать, что эта температура разграничивает режим прилипания контактов и режим их диффузионного сваривания.

При увеличении температуры контактных пятен до  $T_m$  сварка контактов вызывается другим механизмом: происходит их плавление и кристаллизация расплава при последующем остывании. Сварка, вызванная плавлением, практически всегда является фатальной для электрических аппаратов, которые теряют свою работоспособность.

Потеря работоспособности связана с двумя причинами. Во-первых, сила, необходимая для разрыва сварки, может оказаться в данном случае больше максимальной силы, развиваемой аппаратом при разведении контактов. Во-вторых, даже если сварка и будет разорвана, разрушение поверхности контактов оказывается настолько сильным, что при их последующем смыкании будет наблюдаться резкое увеличение контактного сопротивления, что приведет к перегревам контактов и прилегающих элементов токоведущей системы (ТВС) выше допустимых.

Фатальная сварка контактов электрических аппаратов в большинстве случаев происходит при протекании аварийных ударных токов короткого замыкания, характеризующихся наличием аperiodической составляющей, приводящей к выбросам тока в первом полупериоде, значение которых почти вдвое превосходит установившееся значение тока КЗ. Ниже мы будем рассматривать нагрев

замкнутых сильноточных контактов именно такими токами.

Обозначим  $I_w$  и  $I_m$  величины ударного тока КЗ, протекание которых вызывает нагрев контактных пятен до температуры  $T_w$  и  $T_m$  соответственно. Токи величиной  $I < I_w$  безопасны для контактов, токи  $I > I_m$  вызовут их фатальное сваривание. Таким образом, максимально допустимое значение ударного тока КЗ лежит в диапазоне  $I_w < I_{\max} < I_m$ . В [3] показано, как с высокой степенью достоверности можно определить  $I_m$ . Ниже мы обсудим возможность расчета другой границы диапазона — тока начала сваривания контактов  $I_w$ .

Экспериментально определить, как изменяется температура контактного пятна, невозможно. Поэтому для решения данной задачи применяются численные расчеты. Обзор существующих методик проведения расчетов приведен в [1]. Основная трудность при вычислениях заключается в корректном описании процесса изменения размеров контактных пятен при нагреве до температур выше температуры рекристаллизации, особенно при нагреве импульсными токами малой длительности. Учет эффекта расплывания контактного пятна изменяет максимальное значение температуры нагрева до 100% по сравнению со случаем, когда этот эффект не учтен. Процессы размягчения пятна и его сваривания происходят уже на первом полупериоде тока КЗ при наличии аперриодической составляющей.

В работах [4–6] используются модели, в которых предполагается, что размягчение пятна происходит мгновенно при достижении температуры начала рекристаллизации материала. Величина скачка радиуса КП определяется из измеренных значений контактного сопротивления до и после размягчения КП. Такой подход дает существенно заниженные значения величины перегрева контактов.

В [1] описан метод расчета нагрева контактов импульсными токами, позволяющий получить данные о том, как изменяются размеры контактного пятна в процессе его размягчения, и рассчитать изменение распределения температуры в контактах во времени. Этот метод предполагает наличие экспериментально измеренных осциллограмм тока и напряжения на контактах и в этом смысле не является автономным. Однако он предоставляет возможность детального исследования процесса нагрева контактной области в широком диапазоне температур вплоть до плавления. При этом погрешность определения температуры не превышает 10%.

Кратко, суть метода заключается в следующем. Решается нестационарная нелинейная термоэлектрическая задача о нагреве контактов током известной величины. Решение проводится итерационно. Последовательно на каждом шаге по времени задается величина тока и подбирается такое значение радиуса контактного пятна, которое обеспечивает заданную близость расчетного значения напряжения на контактах к экспериментально измеренному, т.е. подбором функции  $a(t)$ , описывающей изменение во времени радиуса контактного

пятна, мы приближаем расчетную кривую контактного напряжения к экспериментальной осциллограмме. В результате вычислений в каждый момент времени определяется распределение температуры в контактной области, а также становится известным изменение радиуса контактного пятна при нагреве.

Данный метод будет использован нами для проведения вычислений прохождения ударных токов КЗ, вызывавших нагрев контактных пятен до температур, при которых происходит размягчение и диффузионное сваривание контактов. Анализ полученных результатов позволит предложить метод оценки величины тока начала сваривания без необходимости проведения каких-либо предварительных экспериментальных измерений.

Следует отметить, что технически чистая медь М1, материал которой взят за основу в настоящей работе, является далеко не единственным материалом, используемым в качестве контактов в высоковольтных аппаратах. В коммутационных аппаратах широко используются, например, тугоплавкие материалы и их композиты с медью. Исследование их свойств может быть темой дальнейших исследований.

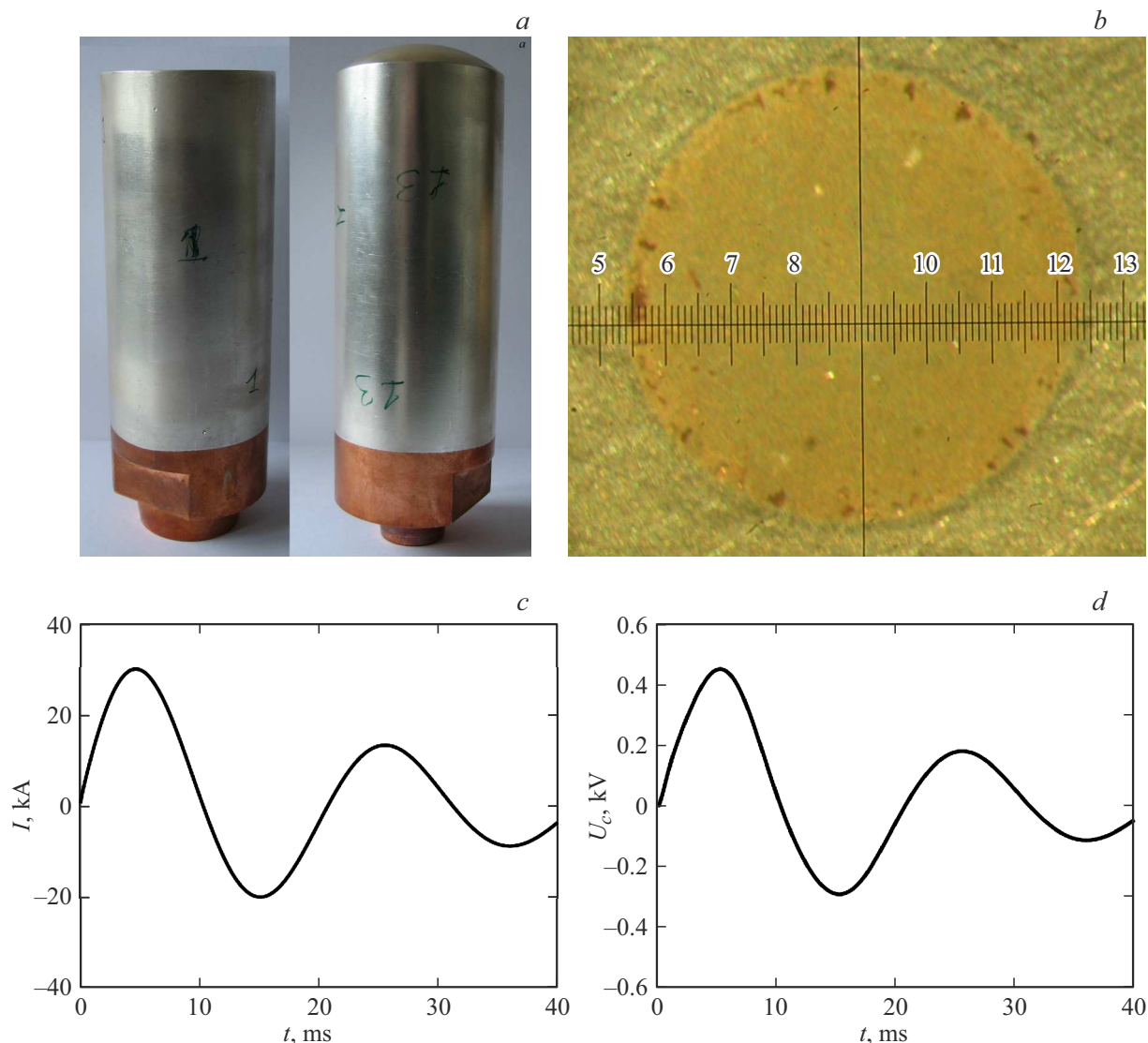
## 1. Анализ результатов измерений и численных расчетов

Расчеты нагрева будем выполнять, основываясь на результатах проведенных экспериментов для цилиндрических медных контактов, соединенных одним контактным пятном круглой формы (рис. 1, *a*). Один из электродов имел плоскую контактную поверхность, другой — закругленную, что обеспечивало круглую форму пятна (рис. 1, *b*). Типичные осциллограммы тока и напряжения приведены на рис. 1, *c, d*.

Эксперименты проводились на оборудовании и по методике, описанной в [3]. Электроды приводились в механическое соприкосновение путем приложения внешней силы, и через них пропускался импульсный ток. Записывались осциллограммы тока и напряжения на контактах, при возникновении сварки измерялась сила отрыва контактов. До и после пропускания тока измерялась величина контактного сопротивления.

В свете решаемой задачи нас интересовали, в первую очередь, те реализации пропускания тока, которые вызывали начальное сваривание контактов. Для обнаружения эффекта возникновения сварки через каждую пару контактов последовательно пропусклась серия импульсов тока с возрастающей амплитудой. После каждого импульса контакты разводились, измерялась сила, необходимая для этого.

В табл. 1 приведены типичные результаты измерений для трех пар контактов при силах контактного нажатия  $F$  300, 1000 и 2500 N. Величина тока, при котором начинается сварка, лежит в диапазоне, границы которого лежат в интервале между максимальным значением тока, при котором сварки еще не было, и минимальным



**Рис. 1.** Цилиндрические электроды с плоской и сферической контактной поверхностью (а), микрофотография контактного пятна (б), осциллограммы тока (с) и контактного напряжения  $U_c$  (д).

**Таблица 1.** Результаты измерений для трех величин силы контактного нажатия

$F = 300 \text{ N}$		$F = 1000 \text{ N}$		$F = 2500 \text{ N}$	
$I, \text{ kA}$	$F_b, \text{ N}$	$I, \text{ kA}$	$I, \text{ kA}$	$I, \text{ A}$	$F_b, \text{ N}$
7.5	0	9.8	0	20.0	0
8.8	0	12.4	0	25.1	0
10.4	1.1	14.9	1.6	30.0	0.8
12	1.3	17.5	3.2	35.0	1.3

значением, когда сварка была обнаружена. Это вторые и третьи строки в табл. 1.

Проведем расчет нагрева контактов по упомянутой выше методике [1] для случая пропускания ударно-

го тока 30 кА при силе контактного нажатия 2500 Н. На рис. 2 приведены полученные зависимости от времени значения радиуса контактного пятна и максимальной температуры контактов (температуры края контактного пятна).

Из графиков следует, что интенсивное расплывание контактного пятна началось при температуре 460 К. Для данной пары контактов начальная диффузионная сварка с силой отрыва 0.8 Н произошла при достижении в контактной области температуры 760 К.

Расчеты нагрева контактов были проведены для всех пограничных реализаций пропускания ударного тока КЗ, подобных тем, что приведены в табл. 1. Кроме того, были рассмотрены случаи однократного пропускания тока через ранее не использовавшиеся контакты, если при этом была зафиксирована сварка без плавления

Таблица 2. Зависимость силы отрыва сварки от температуры

Диапазон температур	Сила отрыва сварки	Примечания
Менее 650 К	0 N	В этом диапазоне температур сварок контактов не возникает
От 650 до 770 К	Не более 50 N	Появляются первые диффузионные сварки с незначительной силой отрыва
От 770 до 910 К	От 50 N до 150 N	Силы отрыва значительно возрастают
От 910 К до температуры плавления 1356 К	Могут оказаться более 500 N	Силы отрыва резко возрастают и приближаются к значениям, характерным для начальных сварок, вызванных плавлением
1356 К	Более 1000 N	Сварки являются фатальными для контактов

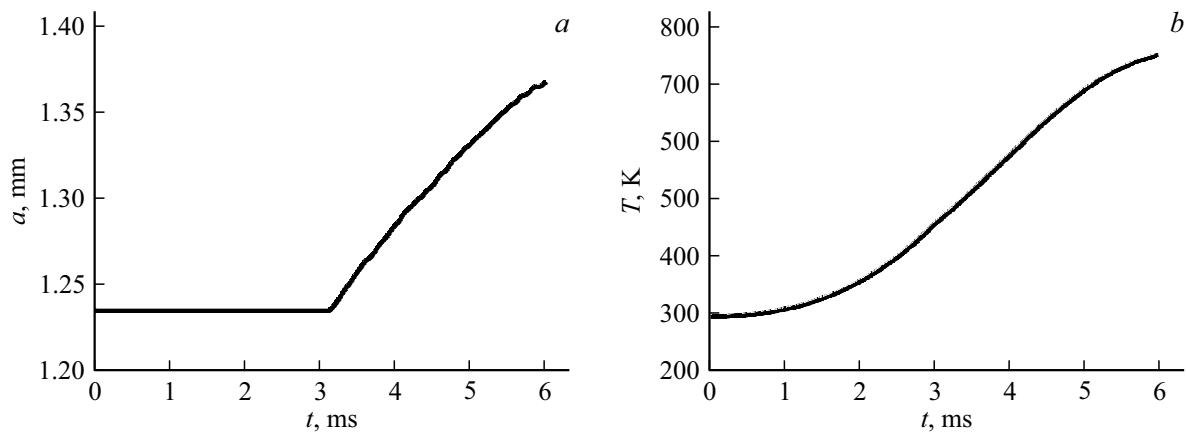


Рис. 2. Зависимости от времени радиуса контактного пятна (а) и максимальной температуры контактов (b).

материала контактов. При этом сила отрыва сварки могла приближаться к значению около 1000 N.

Анализ значительного числа реализаций токов позволил разделить диапазон температур от начальной до плавления и указать характерные для этих диапазонов значения силы отрыва сварки медных контактов. Результаты приведены в табл. 2.

Из этих данных можно заключить, что значение температуры, при которой начинается диффузионное сваривание контактов, составляет 650 К. Строго говоря, именно эту температуру следует выбрать для меди в качестве  $T_w$ . Однако разработчик контактов может увеличить это значение, например, на 100–120 К, если по условиям эксплуатации контактов незначительные диффузионные сварки допустимы. Выбрав значение  $T_w$ , нужно найти величину тока  $I_w$ , который нагревает контакты до этой температуры.

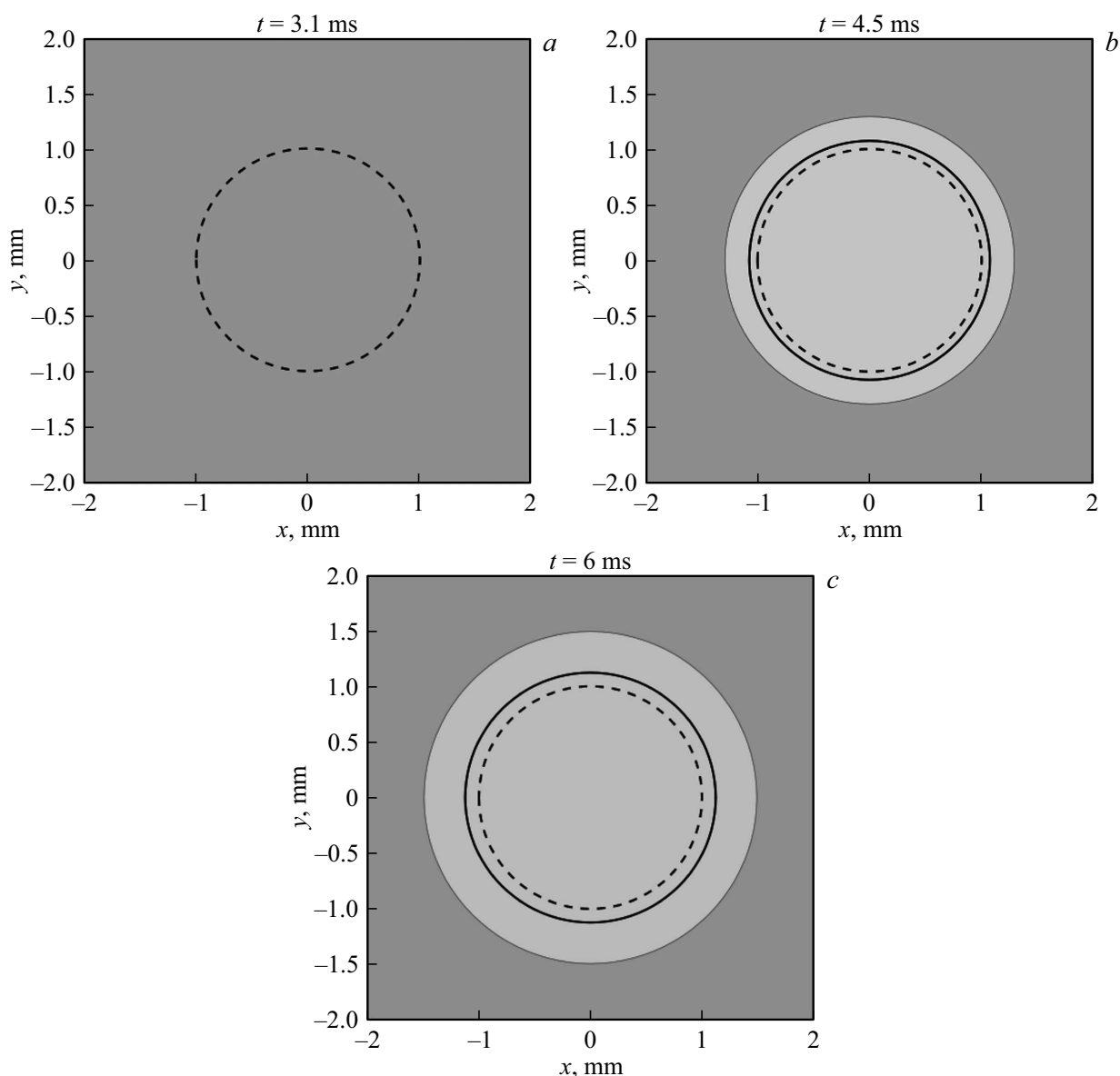
Для решения данной задачи проанализируем процесс расплавления контактного пятна при нагреве, вызванный рекристаллизацией материала. Процесс рекристаллизации металлов и их сплавов, в том числе ее начальная фаза, достаточно подробно изучен и описан в литературе [7].

Пятно начинает интенсивно расплавляться при достижении температуры начала рекристаллизации материала контактов  $T_s$ . Эта температура достигается сначала на контактном пятне в области его края, затем область раз-

мягченного материала распространяется в его окрестности. Очевидно, что увеличение размера контактного пятна при неизменной силе контактного нажатия является следствием увеличения размера области размягченного материала, т.е. той области, где температура выше  $T_s$ . Попытаемся установить эту связь количественно.

На рис. 3 приведены распределения температуры на поверхности одного из электродов в непосредственной близости к контактному пятну в различные моменты времени. При построении использованы два оттенка серого. Темно-серым цветом обозначена область, где температура не превышает  $T_s$ , светло-серым — область, где возникла начальная рекристаллизация. Области разграничены изотермой  $T_s$ . Черная окружность соответствует границе контактного пятна в выбранный момент времени. Начальный размер контактного пятна на всех рисунках обозначен штриховой линией.

Рис. 3, а соответствует моменту времени  $t = t_s = 3.1$  ms, когда на пятне была достигнута температура  $T_s$  начала рекристаллизации. Пятно и его окрестность являются неразмягченными. Рис. 3, b, c соответствуют временам  $t = t_s + 1.4$  ms и  $t = t_s + 2.9$  ms. Эти рисунки иллюстрируют движение края контактного пятна увеличивающейся площади вслед за изотермой  $T = T_s$ , являющейся границей области материала, где начинается рекристаллизация.

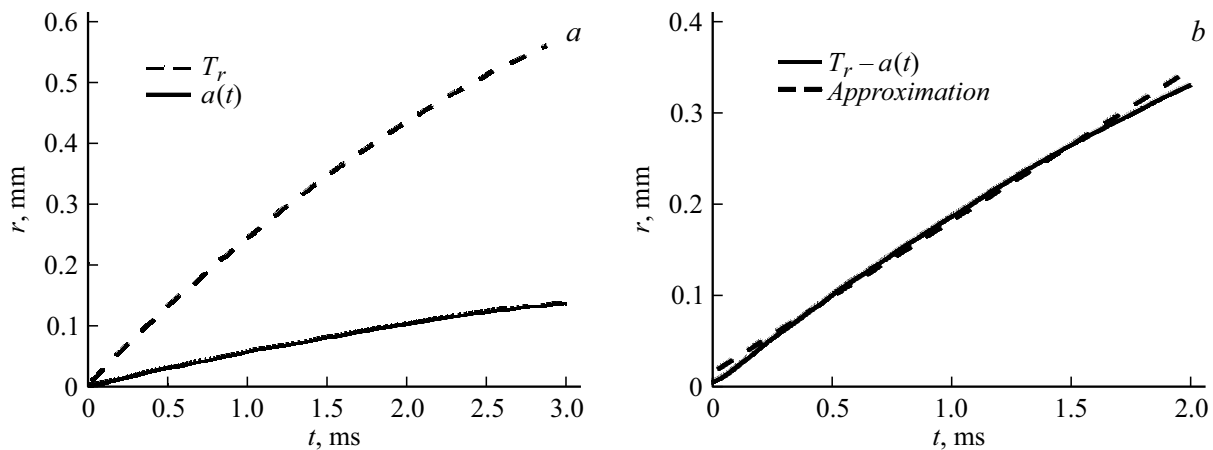


**Рис. 3.** Движение границы контактного пятна (пунктирная линия) и границы области размягченного материала (сплошная линия) при нагреве контактов.

Скорость распространения границы области размягченного материала определяет величину скорости движения границы контактного пятна. Установим количественную связь этих скоростей. Для этого проследим за перемещением изотермы  $T_s$  и перемещением края контактного пятна. Обозначим их координаты  $x_T$  и  $x_{sp}$  соответственно. На рис. 4, *a* для рассматриваемой реализации пропускания тока приведены зависимости  $x_T(t-t_s) - x_{sp}(t_s)$  и  $x_{sp}(t-t_s) - x_{sp}(t_s)$  от времени. Эти кривые выходят из начала координат, так как изотерма  $T_s$  в момент начала расплывания контактного пятна  $t_s$  располагается на его краю — области максимального тепловыделения. Далее граница пятна движется вслед за границей размягченной области, которая определяется изотермой  $T_s$ .

На рис. 4, *b* приведена зависимость от времени расстояния между изотермой  $T_s$  и краем пятна. Она хорошо аппроксимируется прямой. Таким образом, в течение всего времени расплывания пятна относительная скорость  $V_r = d(x_T(t) - x_{sp}(t))/dt$  остается практически постоянной. Это утверждение оказалось справедливым для всех реализаций пропускания тока через контакты, приводивших к возникновению диффузионной сварки.

Вычислим значение относительной скорости  $V_r$  для более чем двадцати реализаций протекания ударного тока КЗ, приведшего к диффузионным сваркам различной интенсивности. Приведем их значения в зависимости от величины максимальной температуры нагрева контактной области протекающим током (рис. 5, *a*).



**Рис. 4.** Зависимость от времени распространения фронта рекристаллизации ( $T_r$ ) и увеличения радиуса контактного пятна ( $a(t)$ ) после момента времени  $t_s = 3$  ms (a); расстояние между изотермой  $T_s$  и краем пятна ( $T_s - a(t)$ ) и линейная аппроксимация данной зависимости (b).

Максимальное отклонение величины  $V_r$  от среднего значения составляет 23%. Эту величину можно существенно уменьшить (более чем на 30%), если сгруппировать реализации по величине силы контактного нажатия (рис. 5, b–d). Зависимость относительной скорости от величины силы контактного нажатия приведена на рис. 5, e. Она практически линейна. Ее можно использовать при проведении расчетов для любых значений силы контактного нажатия из рассмотренного диапазона.

## 2. Методика расчета тока начала сваривания

Если величина относительной скорости  $V_r$  известна, то описать процесс расплывания КП и нагрев контактов до температур, при которых начинается диффузионная сварка, можно без каких-либо предварительных измерений. Последовательность действий здесь такова.

1. Зная форму контактов, величину силы контактного нажатия и  $\sigma$ – $\varepsilon$  характеристику материала при комнатной температуре, определить местоположение и размер КП. Это — стандартная контактная задача, решение которой не сопряжено с какими-либо вычислительными трудностями.

2. Задать форму и величину ударного тока КЗ и решить задачу о нагреве контактов протекающим током до того момента, пока не будет достигнута температура  $T_s$ .

3. После достижения на контактной поверхности указанной температуры следует приступить к итерационной процедуре построения решения с учетом расплывания КП. На каждом интервале времени  $d_t$  задается величина тока, определяется положение изотермы  $T_s$ , и вслед за ней перемещается край пятна с известной относительной скоростью  $V_r$ .

4. Берется следующее значение тока, и процедура решения повторяется.

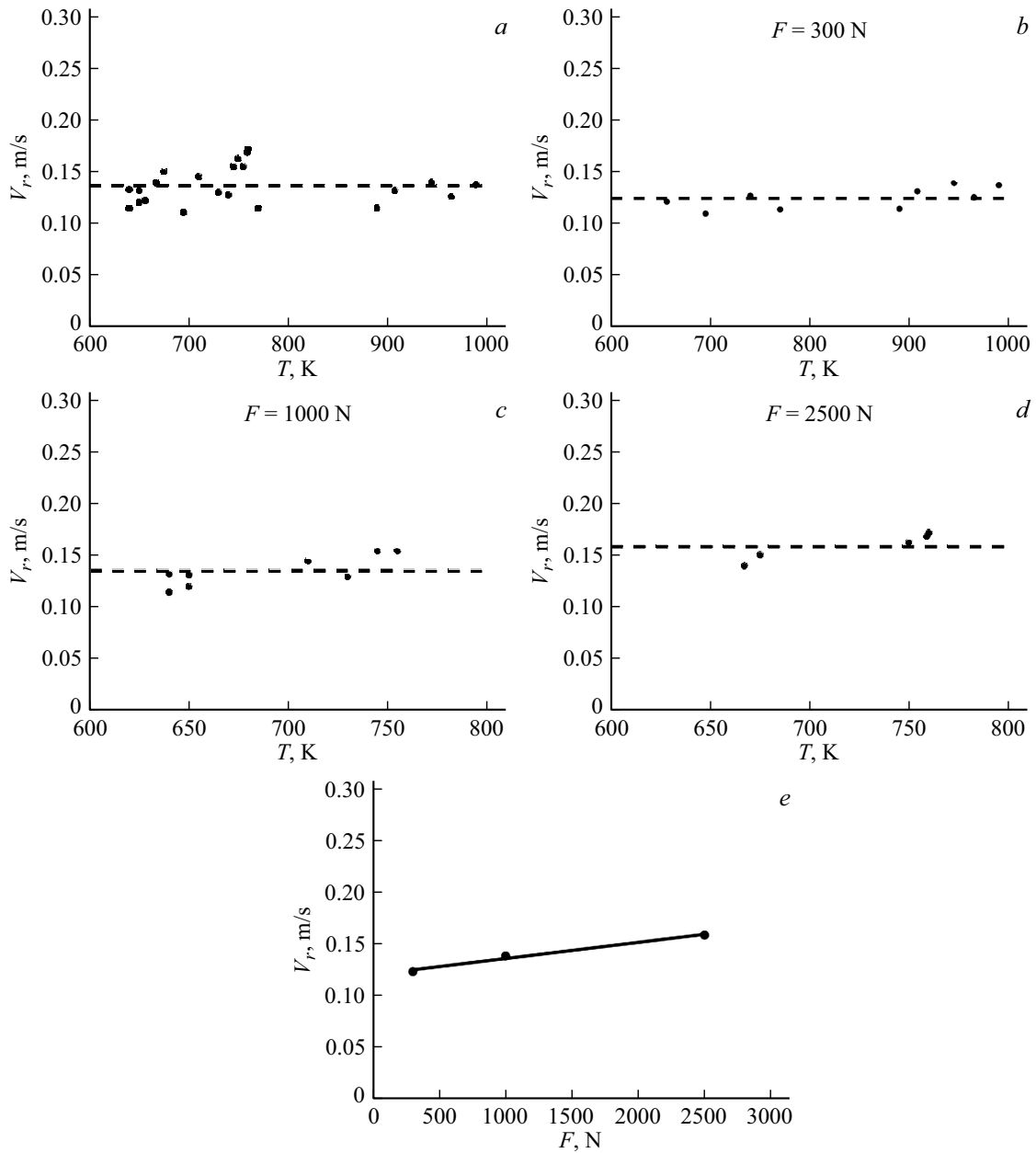
5. Далее при достижении температурой своего максимального значения, что происходит приблизительно через 1–2 ms после прохождения током своего первого максимума, это значение сравнивается с температурой начала сваривания контактов.

6. Путем изменения величины тока строится зависимость максимальной температуры от величины тока, из которой определяется значение, приводящее к начальной сварке, т. е. к нагреву до выбранной температуры  $T_w$ .

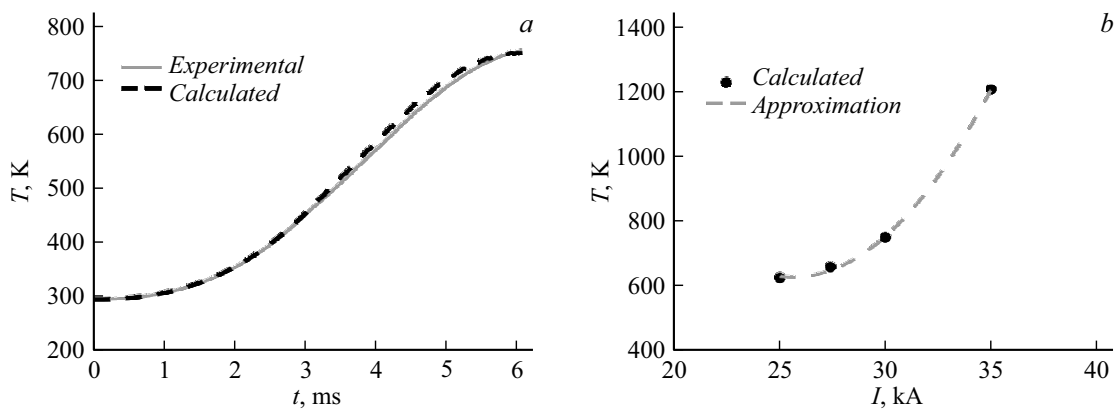
Оценим точность расчета температуры контактов данным способом. Для этого применим предложенную методику для расчета нагрева контактов в рассмотренном случае прохождения тока 30 kA при силе контактного нажатия 2500 N и сравним результаты с приведенными выше. На рис. 6, a приведены кривые изменения максимальной температуры, рассчитанные по методике, основанной на использовании экспериментальных данных [1], и предложенным выше способом. Отличие в значении температуры в момент времени  $t = 6$  ms составляет 10 K.

Аналогичные вычисления были проведены и для других реализаций протекания ударного тока КЗ в диапазоне максимальных температур нагрева от 600 до 1000 K и в диапазоне сил контактного нажатия от 300 до 2500 N. Отличия в нагреве контактной области, полученные по данной методике, и методике, основанной на экспериментальных данных [1], не превышают 10%, что достаточно для проведения практических расчетов.

Найдем теперь величину тока начала сваривания. В качестве  $T_w$  возьмем значение 650 K. Построим зависимость максимальной температуры от величины ударного тока КЗ (рис. 6, b). Отсюда получим искомую величину тока начала сваривания. Она в данном случае составила  $I_w = 27$  kA.



**Рис. 5.** Зависимость относительной скорости  $V_r$  от величины нагрева контактного пятна (*a-d*) и от величины силы контактного нажатия (*e*).



**Рис. 6.** Зависимости от времени максимальной температуры контактов, полученные по экспериментальным данным и методике (*a*) и зависимость максимальной температуры от величины ударного тока КЗ, рассчитанная по методике (*b*).

## Заключение

На основе обобщения экспериментальных данных и результатов сопутствующих численных расчетов нагрева контактов ударными токами КЗ установлена связь между изменением во времени размера области контактов, нагретой выше температуры начала рекристаллизации материала, и изменением размера контактных пятен.

Это позволило предложить методику, которая позволяет рассчитать нагрев контактов до температур, при которых начинается процесс их сваривания с точностью, достаточной для решения практически значимых задач. Так как для расчетов не требуется проведения каких-либо предварительных измерений, она может быть применена на ранней стадии проектирования высокоточных электрических контактов, когда их опытные образцы еще не созданы.

При определении предельных значений ударного тока КЗ разработчик контактов может выбрать максимальное значение температуры  $T_w$ , исходя из допустимой величины силы отрыва сварки, и рассчитать соответствующее значение тока  $I_w$ , протекание которого не вызовет потери работоспособности коммутационного оборудования.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] М.А. Павлейно, О.М. Павлейно, М.С. Сафонов. ЖТФ, **91** (1), 110 (2021). DOI: 10.21883/JTF.2021.01.50281.148-20
- [2] Р. Хольм. *Электрические контакты* (ИИЛ, М., 1961), с. 464.
- [3] О.М. Павлейно. *Физические особенности нагрева высокоточных электрических контактов* (Дис. канд. техн. наук. СПб, 2015), с. 148.
- [4] T. Israel, S. Schlegel, S. Grossmann, T. Kufner, G. Freudiger. *IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Albuquerque, NM* (2018), p. 254–261. DOI: 10.1109/HOLM.2018.8611641
- [5] M. Gatzsche, N. Luecke, S. Großmann, T. Kufner, G. Freudiger. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, **7** (3), 317 (2017).
- [6] T. Israel, M. Gatzsche, S. Schlegel, S. Großmann, T. Kufner, G. Freudiger. *IEEE Holm Conference on Electrical Contacts* (2017), p. 40–49. DOI: 10.1109/HOLM.2017.8088061
- [7] С.С. Горелик. *Рекристаллизация металлов и сплавов* (МИСиС, М., 2005)