

Об особенностях сваривания и разрушения поверхности сильноточных слоистых контактов импульсными токами

А. М. Чалый^а, В. А. Дмитриев^б, *М. А. Павлейно^с, О. М. Павлейно^с, М. С. Сафонов^с

^аЗаконодательное Собрание города Севастополя,
ул. Ленина, 3, г. Севастополь, 299011, Россия

^бПромышленная группа «Таврида Электрик»,
ул. Вакуленчука, 22, г. Севастополь, 299053, Россия

^сНаучно-образовательный центр «Электрофизика» физического факультета
Санкт-Петербургского государственного университета,
ул. Ульяновская, 1, Старый Петергоф, г. Санкт-Петербург, 198504, Россия,

*e-mail: pmf@nm.ru

Проведено численное моделирование воздействия импульсных токов малой длительности на замкнутые сильноточечные алюминиевые контакты с медным покрытием. Рассмотрены режимы токовых воздействий, которые приводят к значительному нагреву контактной области и вызывают плавление и сваривание контактов. Определено влияние толщины медного покрытия на динамику нагрева контактов. В ходе экспериментального исследования воздействия ударных токов короткого замыкания на контакты со слоистой структурой выполнен сравнительный анализ стойкости к подобным воздействиям медного покрытия, изготовленного двумя способами – напылением и плакированием. Определены уровни нагрева контактной поверхности, при которых происходит ее разрушение при разрыве возникающих сварок. Показано, что разрушение напыленных покрытий наблюдается уже на стадии диффузионной сварки, в то время как плакированные слои при тех же уровнях тока существенно не повреждаются.

Ключевые слова: электрический контакт, импульсный нагрев, контактное пятно, сопротивление стягивания, слоистая структура.

УДК 531/534

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время наблюдается тенденция замены элементов сильноточечных токоведущих систем, изготовленных из меди, на менее дорогостоящие алюминиевые аналоги [1]. Однако прямая замена не всегда возможна, что связано с различными свойствами меди и алюминия, такими как удельное сопротивление и температура плавления, с различными технологическими возможностями их обработки, например нанесением гальванических покрытий, и по ряду других причин. Некоторые из подобных трудностей могут быть преодолены путем применения деталей со слоистой структурой. В данной работе рассматриваются сильноточечные алюминиевые контакты, на поверхность которых нанесен слой меди. При правильном выборе толщины покрытия и способа его нанесения такие контакты могут обладать практически такой же стойкостью к ударным токам короткого замыкания, как и чисто медные.

Существует ряд способов нанесения меди на алюминий. Наиболее распространенными являются напыление и плакирование [2, 3]. Медные слои, нанесенные на алюминиевое основание указанными способами, отличаются друг от

друга степенью шероховатости поверхностей и силой сцепления с подложкой. Это может привести к различию их стойкости к разрыву сварок, возникающих при протекании ударных токов короткого замыкания через замкнутые слоистые контакты, что и является основным предметом нашего исследования.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Проведем численный расчет нагрева алюминиевых контактов с медным покрытием импульсным током синусоидальной формы длительностью $\tau = 10$ мс. Близкие по форме токовые воздействия применялись нами в ходе экспериментальных исследований. В качестве контактов выберем соосно расположенные цилиндрические алюминиевые электроды с медным покрытием толщиной d , соединенные одним контактным пятном круглой формы радиуса a , расположенным на оси симметрии. На рис. 1 приведено сечение расчетной модели с указанием распределения линий тока и линий равного потенциала.

Проанализируем влияние толщины покрытия на нагрев контактной области. Процесс прохождения тока через контакты без учета термоэлектрических эффектов описывается следующей системой уравнений:

$$\nabla \bar{j} = 0, \quad (1)$$

$$\gamma c_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla(\kappa \nabla T) = \rho j^2, \quad (2)$$

где T – температура; j – плотность электрического тока; ρ – удельное сопротивление; κ – теплопроводность; γ – плотность; c_p – теплоемкость. К настоящему времени нет единого мнения о том, нужно ли учитывать термоэлектрические токи при нагреве сильноточных электрических контактов [4, 5]. Однако, когда контактирующие поверхности выполнены из меди, их наличием можно пренебречь на фоне токов проводимости [6].

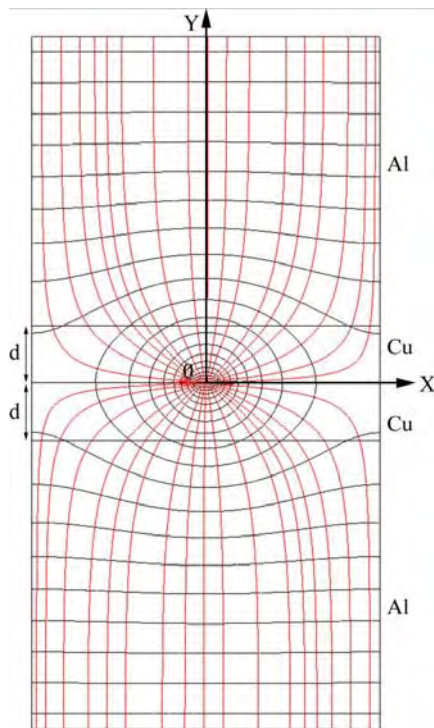


Рис. 1. Модель слоистых контактов. Распределение линий тока и линий равного потенциала.

В [7–9] показано, что в случае медных электродов зависимость радиуса пятна от времени хорошо описывается билинейной кривой. До тех пор, пока температура контакта меньше температуры размягчения материала, радиус контактного пятна незначительно отличается от начального значения ($a = 0,5$ мм в дальнейших расчетах). Затем он начинает возрастать, причем скорость роста радиуса остается практически неизменной вплоть до начала плавления. Примем такое приближение при проведении вычислений в случае слоистых контактов.

На рис. 2 приведены зависимости от времени максимальной температуры контактного пятна алюминиевых электродов для разных значений толщины медного покрытия (сплошные кривые). Величина тока выбиралась таким образом, чтобы в ходе нагрева была достигнута температура плавления меди. На тех же графиках приведены

кривые нагрева для чисто медных контактов при той же величине протекающего тока (пунктирные кривые на графиках).

При выбранной длительности импульса тока различие в нагреве контактных пятен слоистых и чисто медных электродов из-за разных теплофизических свойств меди и алюминия оказывается заметным при малых по сравнению с размером контактного пятна толщинах медного слоя. Так, при толщине слоя, равной половине радиуса пятна, достигаемая температура более чем на 500° превосходит температуру контактного пятна медных электродов. Такие покрытия существенно снизят стойкость контактов к подобным токовым воздействиям. Однако уже при толщине, равной диаметру пятна, кривые нагрева практически совпадают.

На рис. 3 приведена зависимость амплитуды тока, при протекании которого начинается плавление контактных пятен, от толщины покрытия. При $d \geq a$ ток плавления медных и слоистых электродов отличается менее чем на 5%.

Полученные данные о влиянии толщины медного слоя на нагрев слоистых электродов были использованы при изготовлении слоистых контактов для проведения экспериментальных исследований. Толщина покрытия выбиралась такой, чтобы обеспечивалась близость достигаемых при нагреве температур для слоистых и медных контактов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Цель экспериментального исследования воздействия ударных токов на алюминиевые контакты с медным покрытием – изучение начального этапа возникновения сварки подобных контактов и определение максимально допустимых уровней ударного тока для покрытий двух наиболее распространенных типов: изготовленных методом напыления и методом плакирования. В качестве исследуемых образцов были использованы алюминиевые шины прямоугольного сечения с медным покрытием, нанесенным методом плакирования или напыления. Шины применялись в качестве одного из электродов. Другой электрод был изготовлен из меди марки М1Е и имел форму цилиндра со сферической или конусообразной торцевой поверхностью. На контакты был нанесен тонкий слой серебра для уменьшения влияния слабопроводящих пленок.

Испытания слоистых электродов проводились с использованием того же экспериментального оборудования и по схожей методике, что и испытания медных контактов [9]. Осуществлялось сравнение результатов для слоистых электродов двух типов между собой и с результатами, полученными для медных электродов.

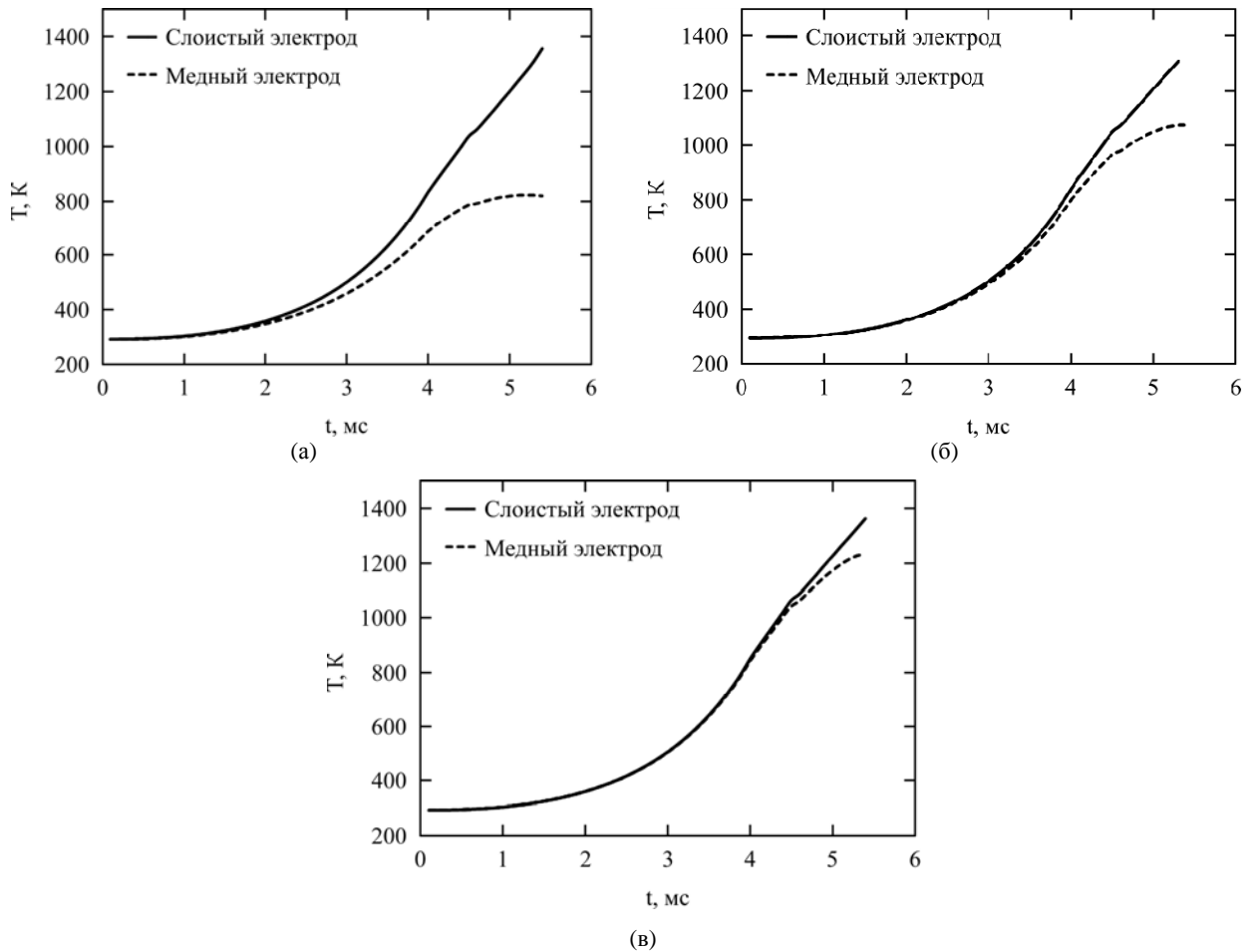


Рис. 2. Зависимости от времени максимальной температуры контактной области слоистых и медных электродов при толщине покрытия $d = 0,5a$ (а), $d = 1a$ (б) и $d = 1,5a$ (в).

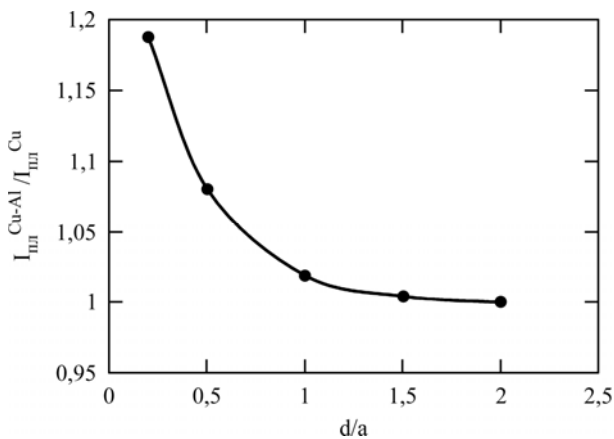


Рис. 3. Зависимость амплитуды тока, приводящего к плавлению электродов, от толщины покрытия.

Зависимость контактного сопротивления R_c от силы контактного нажатия для электродов различного типа приведена на рис. 4. Величина сопротивления для шин с напылением оказалась существенно большей, чем для плакированных шин, в то время как зависимости $R_c(F_{\text{кн}})$ для плакированных алюминиевых шин и медных шин при выбранной толщине покрытия ведут себя практически одинаково. Различие в контактном сопротивлении между двумя типами слоистых контактов уменьшается с ростом величины приложенной силы.

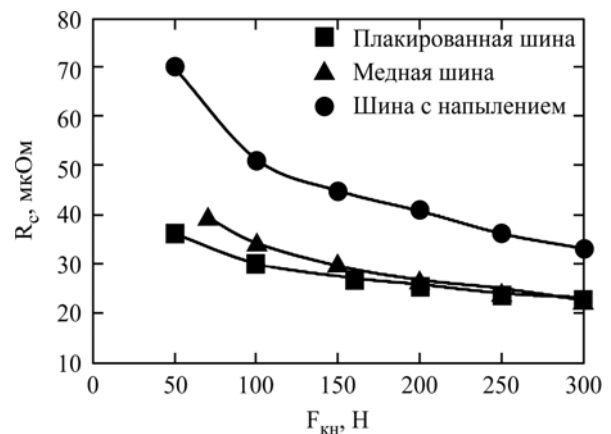


Рис. 4. Зависимость сопротивления холодных контактов от силы контактного нажатия.

Эти измерения позволяют сделать предположение, что при одинаковой силе нажатия стойкость к ударному току контактов с напылением будет ниже, чем для плакированных контактов. Свойства последних с точки зрения прохождения ударных токов могут оказаться близкими к свойствам чисто медных контактов.

Для определения диапазона токов, приводящих к свариванию контактов, были проведены измерения в режиме многократного пропуска импульсов ударного тока с увеличивающейся амплитудой. После этого были собраны данные о

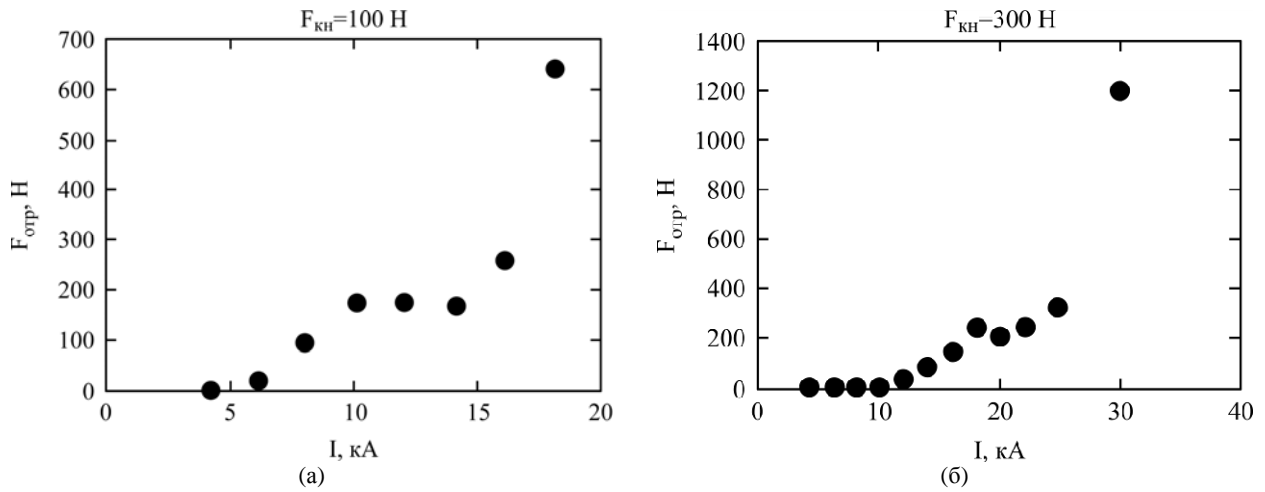


Рис. 5. Зависимость силы отрыва контактов от величины протекающего тока для $F_{\text{кн}} = 100$ Н (а) и $F_{\text{кн}} = 300$ Н (б).

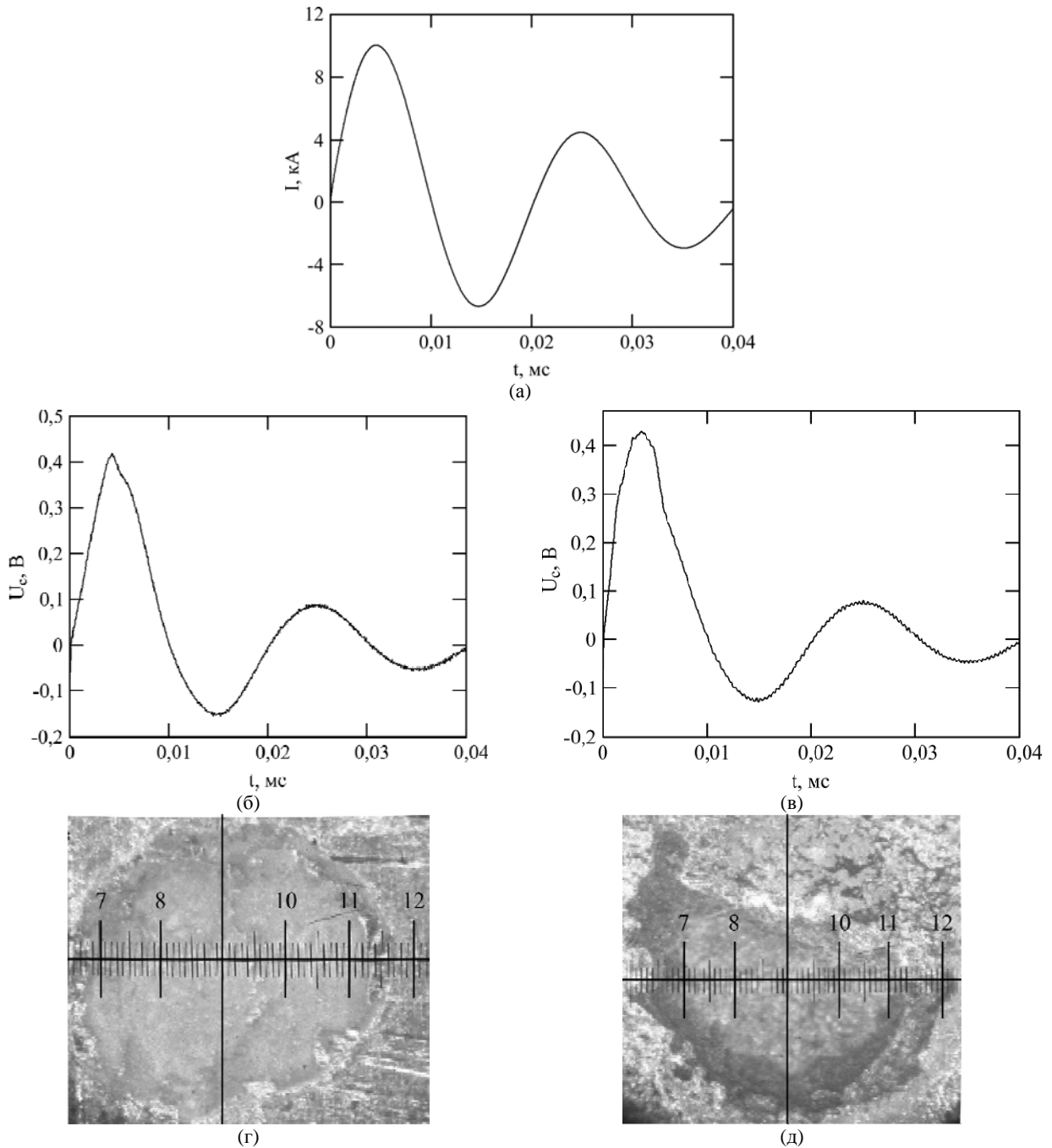


Рис. 6. Ток 10 кА. Осциллограммы силы тока (а), контактного напряжения и фотографии контактной области для плакированной шины (б, г) и шины с напылением меди (в, д).

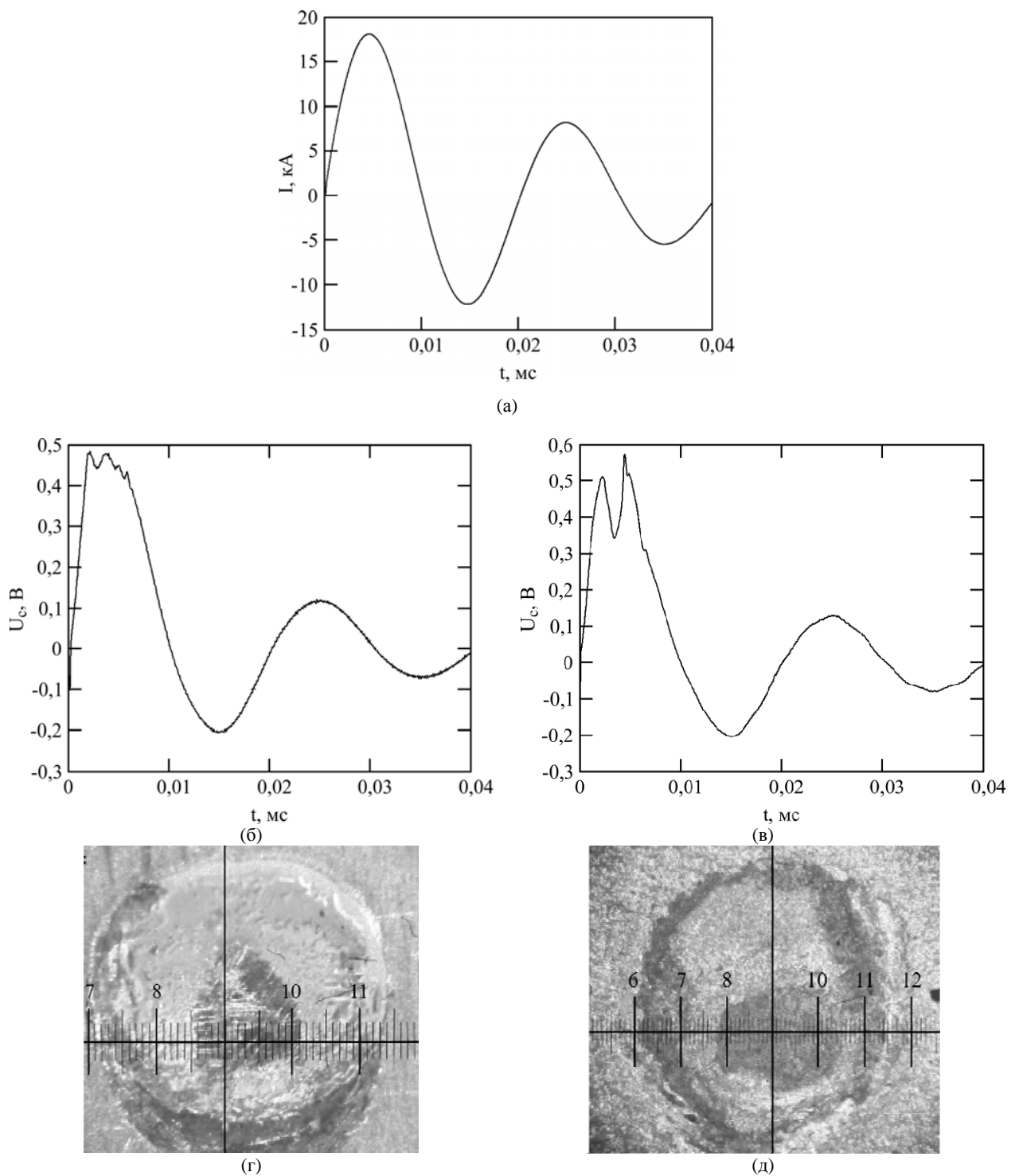


Рис. 7. Ток 18 кА. Осциллограммы силы тока (а), контактного напряжения и фотографии контактной области для плакированной шины (б, г) и шины с напылением меди (в, д).

прохождении одиночных импульсов тока, приводящих к возникновению сварки различной интенсивности. Зависимость силы отрыва сварки от величины пропускаемого тока для плакированных шин при силе контактного нажатия 100 и 300 Н приведены на рис. 5.

При силе контактного нажатия $F_{\text{кн}} = 100$ Н сварка началась при токе 6 кА, плавление – при 18 кА. При меньших токах сварки контактов не происходит, при больших будет происходить разрушение контактов, вызванное интенсивным

плавлением. Аналогичные значения токов для силы $F_{\text{кн}} = 300$ Н составляют 12 и 30 кА.

Сравним стойкость к ударному току алюминиевых шин с разными типами покрытий. Было установлено, что разрушение напыленных покрытий происходит уже на стадии диффузионной сварки (при разведении электродов медный слой отрывается от алюминиевой подложки), в то время как для плакированных шин при тех же уровнях тока медное покрытие существенно не повреждается.

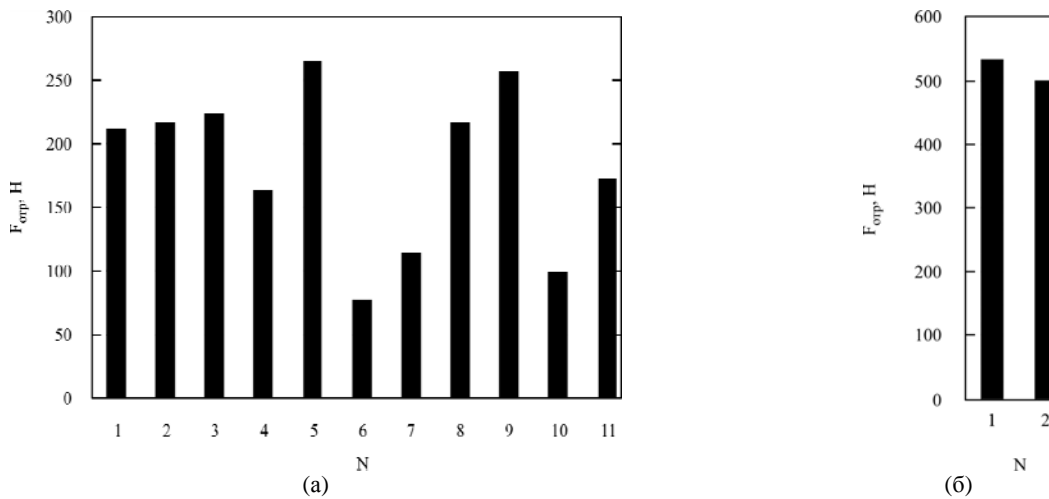


Рис. 8. Значения силы отрыва, соответствующие отслоению меди от алюминия, для шин с напылением (а) и плакированных шин (б) при $F_{кон} = 300$ Н.

Для подтверждения этого рассмотрим четыре реализации прохождения ударных токов величиной 10 и 18 кА при одной и той же силе контактного нажатия 100 Н. На рис. 6 представлены осциллограммы силы тока и контактного напряжения, а также фотографии контактных пятен, сделанные с разным увеличением, после пропускания тока 10 кА.

Для шин обоих типов зафиксирована сварка с силой отрыва около 165 Н. В течение первого полупериода протекания тока контактное напряжение монотонно возрастает. В [9] было показано, что в таких случаях плавление контактной области не происходит, возникающие сварки носят диффузионный характер. Температура, при которой возникает подобное сваривание контактов, составляет $0,5 \div 0,6$ от температуры плавления меди. После разрыва контактов видно, что в случае плакированной шины значительных разрушений медного слоя нет (рис. 6б,г). В случае же шины с напылением происходит отрыв слоя меди от алюминия, поверхность шины имеет необратимые повреждения (рис. 6в,д).

Через другие две пары контактов был пропущен ток величиной 18 кА (рис. 7). В обоих случаях на осциллограммах напряжения видна особенность, которая указывает на то, что произошло плавление контактной области. Несмотря на то что сила отрыва системы с плакированной шиной (405 Н) гораздо больше силы отрыва системы с шиной с напылением (80 Н), контактная поверхность в случае с плакированной шиной после отрыва была повреждена значительно меньше. Видна оплавленная поверхность контактного пятна, но отрыва медного слоя от алюминиевой подложки не произошло. Для шины с напылением снова наблюдается отрыв слоя меди от алюминия, то есть фактическое разрушение контакта.

Посмотрим, при каком значении силы отрыва контактов происходило отслоение меди от алюминия при силе контактного нажатия 300 Н при однократном прохождении импульса тока через электроды. Для шины с напылением (рис. 8а) наблюдается довольно значительный разброс: от 80 до 270 Н. Для систем электродов с плакированной шиной (рис. 8б) отрыв медного слоя от алюминиевого основания при однократном пропускании тока был зафиксирован только два раза из 10 реализаций с плавлением. В остальных случаях разрыв сварки происходил без отрыва слоя меди. Величина силы отрыва оказалась около 500 Н.

Сравнивая результаты для шин с напылением и плакированных шин, можно заключить, что напыленное покрытие оказывается значительно менее стойким к воздействиям ударными токами.

ВЫВОДЫ

Проведены численное моделирование и экспериментальное исследование импульсного нагрева контактов со слоистой структурой. Показано, что при толщине медного слоя больше, чем диаметр контактного пятна, динамика нагрева алюминиевых электродов с медным покрытием практически не отличается от нагрева чисто медных контактов.

Контакты с напыленным покрытием обладают низкой стойкостью к разрыву сварки. Разрушение поверхности таких контактов происходит уже при возникновении диффузионных сварок. Медный слой, нанесенный методом плакирования, разрушается только при разрыве сварок, вызванных плавлением.

ЛИТЕРАТУРА

1. Braunovic M., Konchits V.V., Myshkin N.K. *Electrical Contacts: Fundamentals, Applications and Technology*. Taylor & Francis Group.: New York, 2006, 495 p.

2. Kim I.-K., Hong S.I. *Mater Design*. 2014, **57**, 625–631. doi: 10.1016/j.matdes.2014.01.054
3. Sheng L.Y., Yang F., Xi T.F., Lai C., Ye H.Q. *Compos Part B-Eng*. 2011, **42**(6), 1468–1473. doi: 10.1016/j.compositesb.2011.04.045
4. Ким Е.И., Омельченко В.Т., Харин С.Н. *Математические модели тепловых процессов в электрических контактах*. Алма-Ата: Наука, 1977.
5. Самойлов В.В. *Аналитическое и численное моделирование процессов электро- и теплопереноса в многоточечных электрических контактах*. 2004. Автореф. дис. канд. физ.-мат. наук. Ульяновск, 2004. 28 с.
6. Merkushev A.G., Pavleino M.A., Pavleino O.M., Pavlov V.A. *Tech Phys*. 2014, **59**(9), 1409–1412. doi: 10.1134/S1063784214090175
7. Pavleino O.M., Pavlov V.A., Pavleino M.A. *Surf Eng Appl Electrochem*. 2011, **47**(4), 362–369. doi: 10.3103/S1068375511040119
8. Павлейно М.А., Павлейно О.М., Сафонов М.С. *Вестник ННГУ*. 2011, **4**(4), 1675–1677.
9. Chalyi A.M., Dmitriev V.A., Pavleino M.A., Pavleino O.M. *Surf Eng Appl Electrochem*. 2013, **49**(5), 433–439. doi: 10.3103/S1068375513050025.

Поступила 26.10.15

Summary

The effect of short-duration pulsed currents on closed high-current copper-coated aluminum contacts is studied numerically. Such current regimes are considered, which lead to significant contact area heating and cause melting and welding of the contacts. The influence of the copper coating thickness on the dynamics of contacts heating is estimated. As a result of the experimental study of the effects of initial short-circuit current on the high-current layered contacts, resistance to effects of such kind is analyzed by comparing copper-coatings manufactured using the sputtering and cladding techniques. The heating levels of the contact surface, at which it deteriorates when the welding break occurs, are determined. The deterioration of the sputtered coatings is shown to take place as early as at the stage of diffusion welding, while the clad layers are not significantly damaged at the same current levels.

Keywords: electric contacts, pulse heating, contact spot, constriction resistance, layered structure.