

## Пути снижения потерь электроэнергии в контактных соединениях силовых технологических установок

А. А. Воронин, А. С. Добросотских, П. А. Кулаков,  
В. И. Приходченко

Самарский государственный технический университет, Россия

*Рассматривается применение жидкометаллических и композиционных материалов как один из способов снижения потерь электрической энергии в силовых соединениях. В результате перемешивания интерметаллического порошка  $FeGa_4$  с эвтектическим сплавом галлий—индий—олово образуется электропроводный термостойкий пластичный материал, обладающий устойчивостью гомогенного состояния в широком интервале температур и повышенной вязкостью. Показано, что применение разработанного пластичного электропроводного материала на основе эвтектического сплава позволяет существенно снизить переходное сопротивление в контактных парах медь—медь, медь—сталь, сталь—графит; повысить надежность и производительность работы электролизного оборудования; за счет снижения падения напряжения на контактных переходах обеспечить экономию электроэнергии.*

**Ключевые слова:** жидкометаллические и композиционные контакты, силовые контактные соединения, электропроводные смазки.

Традиционные способы ошиновки технологических установок и шин проводов — болтовые разъемные, болтовые с помощью мощных стальных накладок и неразъемные сварные контактные соединения. В процессе эксплуатации энергоемких технологических установок химических и металлургических производств в условиях повышенных температур и агрессивной среды имеет место старение контактных соединений за счет окисления контактирующих поверхностей контактных соединений и, как следствие, повышение сопротивления контактного перехода, увеличение потерь электрической энергии, которые значительны при технологических токах, равных десятки и сотни килоампер. К традиционным способам реставрации контактных соединений относятся демонтаж, зачистка, в некоторых случаях лужение контактирующих поверхностей. Такие способы возможны при плановых текущих и капитальных ремонтах.

Одним из возможных способов снижения потерь электрической энергии в силовых соединениях является использование жидкометаллических и композиционных материалов. Между твердометаллическими контактирующими поверхностями помещается промежуточный легкоплавкий электропроводный материал, который позволяет значительно увеличить площадь контактирования и тем самым снизить сопротивление контактного перехода. При контактировании жидкометаллического рабочего тела (ЖМРТ) с твердометаллическими контактами на поверхности твердого металла воз-

никают соединения и сплавы, появление которых обусловлено взаимодействием ЖМРТ с твердометаллическим электродом. Переходное контактное сопротивление можно определить по выражению [1]

$$R_{кп} = R_{пл} + R_{спл} + R_{жм}, \quad (1)$$

где  $R_{пл}$ ,  $R_{спл}$ ,  $R_{жм}$  — сопротивление соответственно поверхностных пленок, образованных интерметаллических сплавов и жидкого металла.

В процессе эксплуатации удельное переходное сопротивление изменяется за счет изменения физико-химических свойств ЖМРТ и состояния поверхности твердометаллического контакта, соприкасающегося с жидким металлом. Сопротивление жидкометаллического контактного узла состоит из сопротивлений контактной пары жидкий металл—твердометаллический контакт и сопротивления ЖМРТ в межконтактном объеме:

$$R_k = R_{жм} + R_0 / S, \quad (2)$$

где  $R_0$  — удельное сопротивление между жидким металлом и твердометаллическим контактом;  $S$  — площадь соприкосновения контактной пары в режиме нагрузки.

Характеристики контактов, состоящих из различных пар твердый электрод—жидкий металл, целесообразно сопоставлять с характеристиками жидкого и твердого металлов.

Характеристикой жидкометаллического контакта по жидкому металлу является отношение удельного контактного сопротивления к удельному сопротивлению жидкого металла контактирующей пары

$$F_{ж} = \frac{R_0}{\rho_{ж}}, \quad (3)$$

где  $\rho_{ж}$  — удельное сопротивление жидкого металла.

Характеристикой жидкометаллического контакта по твердому металлу является отношение удельного контактного сопротивления к удельному сопротивлению твердого металла контактирующей пары

$$F_{т} = \frac{R_0}{\rho_{т}}, \quad (4)$$

где  $\rho_{т}$  — удельное сопротивление твердого металла.

Введенные характеристики имеют размерность длины и численно соответствуют той длине жидко- или твердометаллического токопровода, при которой сопротивление их численно равно сопротивлению контакта при условии равенства сечения токопроводов и площади контакта.

В литературе имеется достаточно много сведений о значениях переходного сопротивления [2—6] (таблица). Авторы, исследовавшие жидкометаллический контакт, приводят данные применительно к своим условиям, то есть для определенных значений поверхности, плотности тока, уровня напряжения и формы контактов. Это, по-видимому, и определяет имеющийся разброс полученных данных. В работах специально исследовались зависимости переходного сопротивления от ряда факторов.

В результате исследований, проведенных на модели жидкометаллического контакта [5], обнаружено, что при малой площади контактирования переходное сопротивление устанавливалось не сразу, а в течение

**Удельное переходное сопротивление для различных контактных пар**

Контактная пара	Удельное переходное сопротивление, Ом·м <sup>2</sup>
Медь—эвтектика (галлий — 62%, индий — 25%, олово — 13%)	$18 \cdot 10^{-10}$
Медь—эвтектика (галлий — 67%, индий — 20,5%, олово — 12,5%)	$10 \cdot 10^{-10}$
Ст. 1Х18НДТ—галлий	$7 \cdot 10^{-8}$
Сталь нержавеющей—галлий	$5 \cdot 10^{-7}$
Сталь—эвтектика (галлий — 62%, индий — 25%, олово — 13%)	$75 \cdot 10^{-10}$
Хром необработанный—галлий	$27 \cdot 10^{-10}$
Хром—эвтектика (галлий — 62%, индий — 25%, олово — 13%)	$81 \cdot 10^{-10}$
Никель необработанный—галлий	$3,8 \cdot 10^{-10}$
Никель полированный—галлий	$6,5 \cdot 10^{-10}$
Никель—эвтектика (галлий — 62%, индий — 25%, олово — 13%)	$43,2 \cdot 10^{-10}$

длительного времени изменялось в сторону уменьшения. При больших величинах контактных поверхностей общая величина контактного сопротивления обратно пропорциональна площади контактирования [7]. Однако эти опытные данные получены при малых значениях тока и напряжения. В силовых коммутационных аппаратах при протекании токов, достигающих десятки и сотни ампер, необходимы большие площади контактирования. При этом падение напряжения на контактном переходе может быть значительным.

При исследовании непосредственно шунтирующего выключателя кондукционного типа при токах 25—50 кА удельное переходное сопротивление медь—эвтектический сплав галлий—индий—олово составило  $10^{-9}$  Ом·м<sup>2</sup> [8]. Переходное сопротивление зависит от типа токопровода. Лишь при симметричном токопроводе переходное сопротивление обратно пропорционально площади контактирования.

Применяемые в электрических контактах и коммутационных аппаратах жидкие металлы должны иметь вязкость в определенном диапазоне значений. Очень малая вязкость приводит при эксплуатации к разбрызгиванию жидкого металла, а промежуточное рабочее тело с очень высокой вязкостью препятствует сближению контактов. Одним из способов регулирования вязкости является добавление дисперсных порошков в жидкий металл. Однако такие композиции часто спекаются при высоких температурах и теряют пластичность. Устойчивость гомогенного состояния жидкометаллического рабочего тела может быть обеспечена при использовании в качестве наполнителей для жидкометаллического сплава порошков интерметаллических соединений. В результате перемешивания интерметаллического порошка, например FeGa<sub>4</sub>, с эвтектическим сплавом галлий—индий—олово образуется элект-

ропроводный термостойкий пластичный материал, обладающий устойчивостью гомогенного состояния в широком интервале температур [9].

Проведение промежуточной реакции образования интерметаллидов (галлидов) обеспечивает перевод системы в состояние с минимумом свободной энергии. На эту реакцию расходуется дополнительное количество жидкого металла. Однако затраты этого количества жидкого металла на стадии приготовления электропроводного пластичного материала делают возможным повышение его термодинамической стабильности в режиме эксплуатации. При примерно равном содержании по массе эвтектического сплава и интерметаллического порошка  $FeGa_4$  получают пластичный однородный материал, который хорошо удерживается на наклонных плоскостях контактов и устойчив к разбрызгиванию при коммутациях и ударах.

В общем случае для интерметаллида  $Me_nGa_m$  количественное содержание металла и галлия определяется по формулам

$$\beta_{Me} = \frac{\gamma_{Me} \cdot n}{\gamma_{Me} \cdot n + \gamma_{Ga} \cdot m} \cdot 100\% ; \quad (5)$$

$$\beta_{Ga} = \frac{\gamma_{Ga} \cdot m}{\gamma_{Me} \cdot n + \gamma_{Ga} \cdot m} \cdot 100\% , \quad (6)$$

где  $\beta_{Me}$ ,  $\beta_{Ga}$  — процентное содержание в интерметаллическом порошке металла и галлия;  $\gamma_{Me}$ ,  $\gamma_{Ga}$  — атомные массы металла и галлия;  $n$ ,  $m$  — стехиометрические коэффициенты. Коррозия стали в галлий-индиевом расплаве сопровождается образованием бинарного галлида  $FeGa_4$  с объемно центрированной кубической решеткой ( $a = 0,838$  нм). На диаграмме состояния Fe—Ga в области с относительно небольшим содержанием галлия в зависимости от термической обработки может существовать несколько фаз (5—6).

Для приготовления пластичного электропроводного материала (ПЭМ) использовали железный порошок ПЖР (порошок железный распыленный). Химический и гранулометрический составы, насыпная плотность железных порошков регламентированы ГОСТ 9849-86. Средний размер частиц колеблется от 20 до 400 мкм. Содержание основного металла — не ниже 98—99%. Насыпная плотность равна 2,3—2,9 г/см<sup>3</sup>. Согласно разработанной методике получения ПЭМ, высоких требований к жидкометаллической составляющей по чистоте исходного продукта не предъявляется. Присутствие некоторых добавок даже желательно. Сплав изготавливается из галлийсодержащих отходов и содержит галлия не менее 70%. В качестве основных добавок входят индий и олово. Использование отходов производства позволило снизить стоимость этого сплава примерно в четыре раза по сравнению со сплавом СГИО по ТУ 48-6-72-80 общепромышленного назначения. Технология приготовления пластичного электропроводного материала предусматривает получение порошка интерметаллида в системе железо—галлий и добавление к нему жидкометаллического сплава для обеспечения необходимой вязкости. Дополнительно осуществляется контроль

удельного электрического сопротивления ПЭМ и удельного контактного сопротивления ПЭМ—твердометаллический электрод.

Введение интерметаллических порошков приводит к увеличению вязкости пластичного электропроводного материала по сравнению с чистым галлием в 2343 раза. Удельное электрическое сопротивление ПЭМ составляет  $65 \cdot 10^{-8}$  Ом·м<sup>2</sup>, что примерно в 2,5 раза выше удельного сопротивления жидкого галлия ( $25,9 \cdot 10^{-8}$  Ом·м<sup>2</sup>,  $T = 30$  °С) и в 1,4 раза выше удельного сопротивления твердого галлия ( $45 \cdot 10^{-8}$  Ом·м<sup>2</sup>,  $T = 20$  °С).

Испытания показали, что при нормальной температуре переходные сопротивления болтовых медных контактов с использованием ПЭМ близки к таковым сварных контактов. Введение ПЭМ в межконтактный промежуток болтовых соединений снижает переходное сопротивление в 2—4 раза. В тех же условиях в паре сталь—графит оно снижается в 10 раз. Переходное сопротивление контактов с ПЭМ практически не зависит от степени контактного нажатия, следовательно, для таких контактов можно применять болты меньшего диаметра и меньшее усилие контактного нажатия.

Разработанный ПЭМ использован для обработки контактных площадок медь—медь и медь—сталь в условиях производства хлора, работающих в диапазоне температур 100—250 °С. Пластичный материал наносится на контактные площадки со средней толщиной 0,2 мм. Средние значения падений напряжения по результатам 500 измерений в течение трехлетней эксплуатации для контактов размером 0,05x0,1 м и при токе 2 кА равны 45 мВ для площадок медь—медь и 64 мВ для площадок медь—сталь.

Применение жидкометаллического рабочего тела позволило создать работоспособные разъемные контакты медь—медь, медь—сталь для условий агрессивной среды (хлор, запыленность порошком CaCl<sub>2</sub>) и высоких температур. При таком решении исключается использование сварки в цеховых условиях, что значительно улучшает условия труда. Кроме того, из-за существования вблизи электролизеров сильных магнитных полей сварку приходится вести при отключении тока всей серии ванн. Замена анодов на каждом электролизере производится достаточно часто, в среднем 2—3 раза в год. Таким образом, применение разъемных жидкометаллических контактов вместо сварки приводит к повышению производительности электролизного оборудования.

Недостатком ПЭМ на основе галлийсодержащих сплавов является высокая стоимость и категорический запрет на их использование в контактных соединениях, где для твердометаллических контактов применяется алюминий. При соприкосновении галлийсодержащих сплавов с контактной поверхностью алюминия при высокой влажности возникает химическая реакция и разрушение алюминия. В связи с этим разработаны электропроводящие смазки, которые позволяют снизить электрическое сопротивление контактов на 10—50% [10].

## Выводы

В результате перемешивания интерметаллического порошка FeGa<sub>4</sub> с эвтектическим сплавом галлий—индий—олово образуется электропроводный термостойкий пластичный материал, обладающий

устойчивостью гомогенного состояния в широком интервале температур и повышенной вязкостью.

Использование пластичного электропроводного материала в межконтактных промежутках болтовых соединений позволяет:

существенно снизить переходное сопротивление в контактных парах медь—медь, медь—сталь, сталь—графит;

повысить надежность и производительность работы электролизного оборудования;

за счет снижения падения напряжения на контактных переходах обеспечить экономию электроэнергии.

1. Дегтярь В. Г., Нестеров Г. Г. Контактные коммутирующие устройства электрических аппаратов // Итоги науки и техники. Серия “Электрические аппараты”. Т. 2. — М.: ВИНТИ, 1980. — 99 с.
2. Таев И. С. Электрические контакты и дугогасительные устройства аппаратов низкого напряжения. — М.: Энергия, 1973. — 423 с.
3. Декуре Р. К., Упит Г. П. Некоторые вопросы контактных свойств металлических поверхностей // Труды Института физики АН Лат.ССР. — Рига, 1961. — Вып. 2. — С. 141—150.
4. Васильченко Н. А., Петинова Т. Н., Фрид Г. М. Исследование электрического переходного сопротивления между твердым и жидким металлом // Сб. материалов к VI Таллинскому совещанию по электромагнитным расходомерам и электротехнике жидких проводников. — Таллинн, 1973. — Вып. 3. — С. 63—71.
5. Дегтярь В. Г. Модель жидкометаллического контакта и некоторые исследования, проведенные на ней // Там же. — С.
6. Веретенков А. В., Зазовский Д. К., Кулаков П. А. и др. Сильноточный коммутационный аппарат кондукционного типа с жидкометаллическим рабочим телом // Пути повышения качества и надежности электрических контактов: Тез. докл. к Всесоюз. науч.-техн. совещанию. — Л., 1978. — С. 92—93.
7. Лысов Н. Е., Годжелло А. Г., Мейксон В. Г., Дегтярь В. Г. Сопротивление жидкометаллического контакта // Электротехника. — 1969. — № 1. — С. 29—31.
8. Кулаков П. А., Новиков О. Я., Приходченко В. И., Танаев В. В. Сильноточные коммутационные аппараты с жидкометаллическими контактами // Обзорная информация. Сер. ТС-7. Аппараты низкого напряжения. — М.: Информэлектро, 1982. — 52 с.
9. Воронин А. А., Кулаков П. А., Новиков О. Я., Приходченко В. И. Пластичный электропроводный материал // Электрические контакты: Материалы Международ. конф. — С.-Пб., 1996. — С. 45—46.
10. Воронин А. А., Добросотских А. С., Косорлуков И. А., Шевченко В. Б. Улучшение контактных соединений в энергоустановках с целью уменьшения потерь электроэнергии // Материалы докл. науч.-техн. конф. “Инновационные технологии в управлении, образовании, промышленности АСТИНТЕХ-2010” — Астрахань: Изд. Дом. “Астраханский университет”, 2010. — Т. 2. — С. 17—19.

### **Шляхи зменшення утрат електроенергії в контактних з'єднаннях сильноточових технологічних установок**

О. А. Воронін, А. С. Добросотських, П. А. Кулаков,  
В. І. Приходченко

*Розглянуто застосування рідкометалевих і композиційних матеріалів як один із способів зниження утрати електричної енергії у сильноточових з'єднаннях. В результаті перемішування інтерметалевого порошку  $FeGa_4$  з евтектичним сплавом галій—індій—олово утворюється електропровідний термостійкий пластичний матеріал зі стійкістю гомогенного стану в широкому інтервалі температур та підвищеною в'язкістю. Показано, що застосування розробленого пластичного електропровідного матеріалу на основі евтектичного сплаву дозволяє суттєво знизити перехідний опір в контактних парах мідь—мідь, мідь—сталь, сталь—графіт; підвищити надійність та продуктивність роботи електролізного обладнання; за рахунок зниження падіння напруги на контактних переходах забезпечити економію електроенергії.*

**Ключові слова:** *рідкометалеві та композиційні контакти, сильноточові контактні з'єднання, електропровідні мастила.*

### **Ways of decrease in losses of the electric power to contact connections the strong current technological installations**

A. A. Voronin, A. S. Dobrosotskikh, P. A. Kulakov, V. I. Prikhodthenko

*Application is examined liquid-metal and composition materials, as one of methods decline of losses of electric energy in high-current connections. As a result of interdiffusion of intermetallic powder of  $FeGa_4$  with an eutecticum alloy Ga—In—Sn, electroconductive appears heat-resistant plastic material, possessing stability of the homogeneous state in the wide interval of temperatures and enhanceable viscosity. It is shown that application of the worked out plastic electroconductive material on the basis of eutecticum alloy allows: substantially to reduce transitional resistance in pin pair copper-copper, copper-steel, steel-graphite; to promote reliability and productivity of work of electrolysis equipment; due to the decline of power failure on pin transitions to provide the economy of electric power.*

**Keywords:** *liquid metal and composition contacts, high-current contact connections, electroconductive greasings.*