УДК 621.891: 621.313.04

НЕКОТОРЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СРЕД В СКОЛЬЗЯЩИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТАКТАХ

А.А. МИТЮРЕВ, канд. техн. наук

Тверской государственный технический университет
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: and.mit@westa69.ru

© Митюрев А.А., 2023

Приведено описание конструкции установки на базе прибора для измерения микротвердости ПМТ-3 с целью исследования фрикционных и электрических характеристик скользящих контактов с промежуточной жидкометаллической (ЖМ) средой для электрических машин и аппаратов. Установка позволяет оценить фрикционную устойчивость ЖМ-покрытия при относительном сдвиге твердых контакт-деталей, определять контактное электрическое сопротивление промежуточных ЖМ-сред в диапазоне температур 20…250 °С. Проведен сравнительный анализ возможности применения для скользящих электрических контактов образованных на твердых контакт-деталях различными способами ЖМ-покрытий. Доказано преимущество ЖМ-покрытия на основе галлия и его эвтектических сплавов, полученного при механической обработке твердой поверхности контакт-детали под слоем жидкого металла.

Ключевые слова: скользящий электрический контакт, трение, изнашивание, жидкометаллический контакт, галлий, эвтектический сплав, контактное сопротивление.

DOI: 10.46573/2658-5030-2023-1-11-18

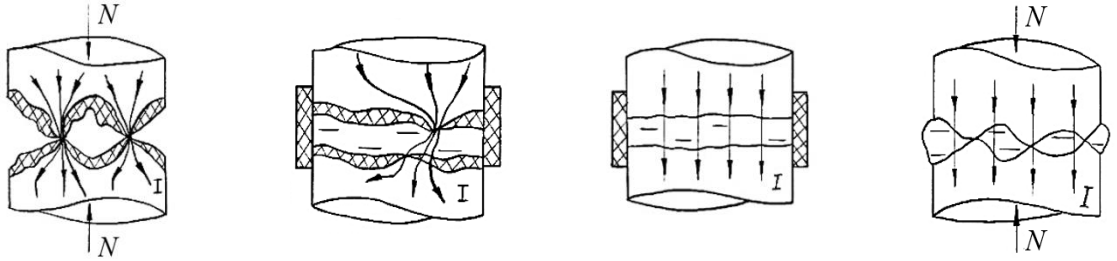
ВВЕДЕНИЕ

Поиск инновационных технических решений для современной энергетики высоких мощностей, особенно для многоамперных электрических машин и аппаратов, разработка перспективных материалов и устройств, работа которых базировалась бы на новых принципах действия, вызвало усиление внимания к жидкометаллическим контактам (ЖМК). Эти контакты в ряде случаев позволяют существенно снизить или полностью заменить использование дефицитного серебра в производстве сильноточных контактных узлов, значительно (до 10 раз) уменьшить в них величины контактного нажатия, в целом упростить конструкции электрических аппаратов, перейдя на другие, технически более эффективные схемы коммутации огромных по величине (до 200 кА) токов, широко применяемых в настоящее время металлургическом и химическом производствах, сложнейшем оборудовании сверхпроводящих систем и ускорителей элементарных частиц, мощных жидкометаллических (ЖМ) насосах и реостатах, робототехнике, 3D-принтерах, атомной и аэрокосмической технике [1].

Несмотря на достигнутые в синтезе материалов для ЖМК успехи и очевидные эксплуатационные преимущества ЖМК (малое и стабильное переходное электрическое сопротивление, хорошие возможности охлаждения, не подвержены свариванию при больших токах и температурах, отсутствие вибраций), производство контактных устройств на их основе ограничено из-за отсутствия исследований, посвященных трению, изнашиванию и электрической проводимости таких контактов при граничном трении, то есть взаимодействию твердых контакт-деталей через промежуточную

ЖМ-среду, и изучению фрикционных и электрических характеристик самой ЖМ-среды и их взаимного влияния.

Электрический контакт твердых контакт-деталей через промежуточную ЖМ-среду можно представить как синтез традиционного твердометаллического (ТМ) контакта Р. Хольма (рис. 1а) [2], работающего без промежуточной электропроводящей смазки (для его нормальной работы требуется определенное контактное нажатие (нагрузка) N), и классического ЖМК П. Клауди [3−5], где ТМ-элементы вдоль всей своей контактирующей поверхности разделены жидким металлом с наличием (рис. 1б) и отсутствием (рис. 1в) инородных слоев в виде окисных пленок и интерметаллических соединений на твердых контакт-деталях (в этом ЖМК необходимость в контактном нажатии N отсутствует). В таком комбинированном электрическом контакте (рис. 1г) взаимодействующие поверхности ТМ-элементов на наибольшую высоту микронеровностей профиля R_{max} смочены жидким металлом, который удерживается в микровпадинах ван-дер-ваальсовыми силами и силами поверхностного натяжения [6]. После приложения контактной нагрузки N осуществляются механический контакт вершинами микронеровностей и полное заполнение межконтактного зазора жидким металлом. Перенос энергии происходит через пятна ТМ-контакта на вершинах микронеровностей и контакт остальной поверхности ТМ-элементов с жидким металлом в межконтактном зазоре. Существующие технологии смачивания жидкими металлами и предварительной обработки контактных ТМ-поверхностей позволяют избегать образования инородных слоев, что делает технически возможным прохождение электрического тока, практически равномерно распределяемого по всей контактной поверхности (рис. 1в, г).



(а) (б) (в) (г)

Рис. 1. Модели проводимости электрических контактов: твердометалического по Р. Хольму (а); ЖМК по П. Клауди с наличием инородных слоев на твердых контакт деталях (б); ЖМК по П. Клауди с отсутствием инородных слоев на твердых контакт деталях (в); комбинированного с промежуточной ЖМ-средой (г)

Было высказано предположение, что при проведении качественной предварительной подготовки контактных ТМ-поверхностей под слоем жидкого металла качество получаемого ЖМ-покрытия будет обеспечивать надежный фрикционный и электрический контакт твердых контакт-деталей через промежуточную ЖМ-среду, которая, помимо существенного уменьшения контактного электрического сопротивления, будет выполнять функции смазки по снижению трения и устранению схватывания между контакт-деталями, а роль контактной нагрузки N в механизме электрической проводимости в комбинированном ЖМК может быть незначительной, несмотря на наличие дискретного контакта ТМ-микронеровностей [6−9]. Поэтому в настоящей работе ставилась цель сравнить различные методы получения промежуточных ЖМ-сред между ТМ-контакт-деталями с точки зрения возможности и целесообразности применения в скользящих электрических контактах.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения исследований фрикционных и электрических характеристик скользящих контактов с промежуточной ЖМ-средой был разработан стенд ПМТ-3ЭЛ на базе прибора для измерения микротвердости ПМТ-3, в котором алмазная пирамидка для моделирования единичной микронеровности твердой контакт-детали была заменена держателем сферического зонда из вольфрама, инертного к воздействию жидкого галлия и эвтектических сплавов на его основе (рис. 2).

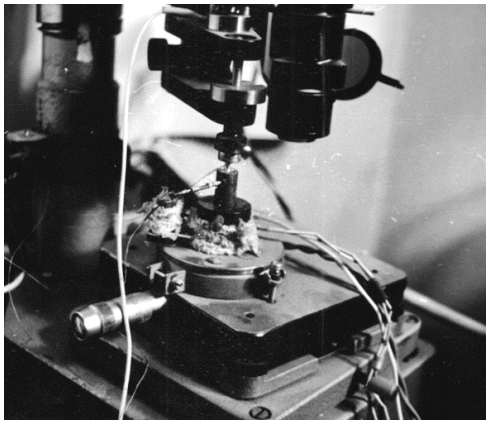


Рис. 2. Контактный узел стенда ПМТ-3ЭЛ

Применение прибора ПМТ-3 позволило обеспечить с высокой точностью заданное усилие нажатия на зонд в диапазоне N = 5…200 г с помощью комплекта гирь из комплектации прибора, а также контролируемый сдвиг зонда при контакте с плоским ТМ-образцом с помощью штатного механизма перемещения стола прибора. Микроскоп прибора давал возможность наблюдать состояние поверхности ТМ-образца с ЖМ-покрытием после сдвига зонда. Держатель ТМ-образца был снабжен нагревателем, что дало возможность проводить исследования при температурах до 250 °С. Измерения контактного сопротивления $R_к$ осуществлялись методом вольтметра-амперметра при постоянном измерительном токе I = 10; 100; 1000 мА и компесацией термо-ЭДС во время испытаний при повышенных температурах путем изменения полярности зонда.

Принципиальная схема стенда ПМТ-3ЭЛ изображена на рис. 3. Измерительный узел для исследования фрикционных и электрических характеристик контакта через промежуточную ЖМ-среду состоял из держателя 1 алмазной пирамиды, в котором размещалась обойма 2 вольфрамового зонда 3 диаметром d = 2 мм, держателя 4 ТМ- образца 8, электрически изолированного от стола 6 прибора ПМТ-3 прокладкой 7. Токовый провод 5 был подведен к держателю, второй токовый провод (не показан) крепился к корпусу нагружающего устройства. Контактное падение напряжения ΔU снималось с помощью потенциальных проводов 9 и 10.

На стенде ПМТ-3ЭЛ исследовались следующие методы получения ЖМ- покрытия:

гальваническое осаждение галлия на твердую контакт-деталь;

использование материала-посредника (например, олова, цинка), хорошо взаимодействующего с галлием;

смачивание жидким металлом ювенильной поверхности;

механическая обработка твердой контакт-детали под слоем жидкого металла (например, скребком, скальпелем, надфилем), предложенная П. Клауди [2, 3] и В.Г. Дегтярем [7].

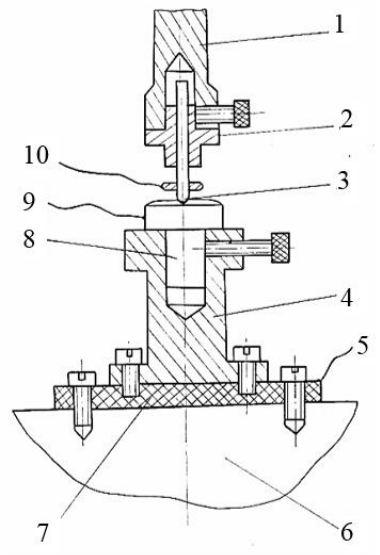


Рис. 3. Схема стенда ПМТ-3ЭЛ

Гальваническое осаждение галлия производилось из сульфанатного электролита. В состав применяемого электролита входили хлорид галлия 30…50 г/л и сульфаминовая кислота 100…150 г/л. Кислотность электролита pH доводилась до 2…2,5 аммиаком. В качестве анода использовалась платина. Режим осаждения: катодная плотность тока 20…120 А/дм^2, температура 25 °С, скорость осаждения до 7 мкм/мин [8].

В качестве металла-посредника перед нанесением эвтектик галлия применялось олово. Лужение проводилось с предварительной очисткой образцов после их протачивания на токарном станке: последовательно промывали контактную поверхность бензином, ацетоном, этиловым техническим спиртом и протирая хлопчатобумажной тканью. Для лучшего взаимодействия галлия и его эвтектик с контактной поверхностью и уменьшения остатков флюса использовалась выдержка образцов с ЖМ-покрытием при температуре 250 °С, что выше $T_{пл}$ олова.

Режимы смачивания жидким металлом варьировались от простейшей зачистки ТМ-образцов наждачной бумагой и последующей промывки растворителями до обработки контактных поверхностей под слоем кипящего при температуре 80 °С флюса (30 % канифоли, 70 % технического спирта). Остатки флюса удалялись промывкой бензином и протиркой хлопчатобумажной тканью. Нанесение жидкого металла осуществлялось окунанием в ванну с растиранием стеклянной палочкой.

Механическая обработка скальпелем твердых контактных поверхностей под слоем жидкого металла проводилась после предварительной абразивной зачистки образцов наждачной бумагой и шлифовальными пастами с последующей промывкой и обезжириванием в органических растворителях.

Для исследования использовались ТМ-образцы из типичных электротехнических материалов: меди, никеля, латуни Л63 и ЛС59-1. Указанные образцы представляли собой цилиндры высотой и диаметром 20 мм.

В качестве промежуточной ЖМ-среды в контактах применялись жидкий галлий (Ga, $T_{пл}$ = 29,8 °С), эвтектика GI (77,5 % Ga – 22,5 % In; $T_{пл}$ = 15,8 °С), эвтектика GIS (62 % Ga – 25 % In – 13 % Sn; $T_{пл}$ = 10,3 °С) (указаны проценты по массе).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты сравнения на стенде ПМТ-3ЭЛ электрического контактного сопротивления ЖМК как одного из критериев возможности применения галлия и его эвтектических сплавов в скользящих электрических контактах при различных способах образования ЖМ-покрытия на твердых контакт-деталях при двадцатипятикратных измерениях представлены в табл. 1.

Высокое контактное сопротивление $R_к$ при гальваническом методе нанесения галлия на твердый образец контакт-детали объясняется попаданием в ЖМ-покрытие части электролита из раствора. Последующая промывка контактных поверхностей в свежеприготовленном расплаве жидкого металла требуемого эффекта последующего снижения $R_к$ не дает.

Большой диапазон значений контактного сопротивления $R_к$ при лужении получен из-за того, что вредное воздействие остатков флюса в ЖМ-покрытии удается частично нейтрализовать нагревом и выдержкой образцов при температуре, которая выше температуры плавления металла-посредника (олова).

Таблица 1. Зависимость электрического сопротивления ЖМК от способа получения ЖМ-покрытия (для пары: образец (плоскость) – медь; контробразец (сфера, d = 2 мм) – вольфрам)

Способ получения ЖМ-покрытия	Технология подготовки поверхности образца и контробразца	Условия эксперимента	Контактное сопротивление $R_к$, 10^{-3} Ом
1	2	3	4
1. Без ЖМ-среды (для справки)	1.1. Без покрытия жидким металлом. Очистка – наждачная бумага, промывка ацетоном, спиртом, протирка хлопчато-бумажной тканью	N = 20 г; I = 0,1 А; T = 20 °С	296±171
	1.2. Образец покрыт оловом (лужение). Очистка по п. 1.1		584±389
2. Гальванический	2.1. Образец гальванически покрыт Ga	N = 20 г; I = 0,1 А; T = 30 °С	729±244
	2.2. Образец после осаждения Ga промыт в жидком Ga		217±52
3. Лужение (образец после предварительного нанесения олова покрыт эвтектикой GI; контробразец покрыт эвтектикой GI)	3.1. Очистка по п. 1.1	I = 0,01 А; T = 20 °С; N = 10 г	12,0±6,6
		N = 20 г	10,6±6,7
		N = 10 г	10,7±6,1
	3.2. Очистка по п. 1.1, выдержка 15 мин при нагреве до 250 °С, охлаждение до 20 °С и выдержка 15 мин под слоем GI	I = 0,01 А; T = 20 °С; N = 20 г	2,29±1,05
	3.3. Подготовка по п. 3.2 и выдержка 48 ч при 20 °С под слоем GI		1,23±0,21

Окончание табл. 1

1	2	3	4
3. Лужение (образец после предварительного нанесения олова покрыт эвтектикой GI; контробразец покрыт эвтектикой GI)	3.4. Подготовка по п. 3.2 и выдержка 48 ч при 100 °С под слоем GI	I = 0,1 А; T = 20 °С; N = 20 г	0,505±0,110
	3.5. Очистка по п. 1.1, выдержка 15 мин при нагреве до 250 °С, медленное (в течение 1 ч) охлаждение с нагревателем до 20 °С под слоем GI, промывка в свежем GI		0,383±0,045
4. Смачивание (образец и контробразец покрыты эвтектикой GI)	4.1. Очистка – абразивная бумага, промывка ацетоном, спиртом, обработка флюсом при 20 °С, тщательная промывка спиртом, протирание хлопчатобумажной тканью		0,595±0,136
	4.2. Очистка – абразивная бумага, промывка ацетоном, спиртом, кипящий флюс, тщательная промывка бензином, спиртом, протирание хлопчатобумажной тканью		0,605±0,166
	4.3. Очистка по п. 4.2, выдержка образца в течение 240 ч при 20 °С под индентором при нагрузке N = 20 г		0,481±0,122
5. Механическая обработка (образец и контробразец покрыты эвтектикой GI)	5.1. Очистка по п. 4.2, обработка скальпелем под слоем GI		0,315±0,016

При смачивании жидким металлом ювенильной поверхности образцов средний диапазон значений контактного сопротивления $R_к$ объясняется тем, что при получении очищенной поверхности обработкой абразивами и последующей промывкой растворителями, которые объективно занимают некоторое время, часть твердой поверхности неизбежно окисляется, что сказывается на однородности свойств получаемого ЖМ-покрытия.

Механическая обработка скальпелем твердой поверхности образца контакт-детали под слоем жидкого металла показала стабильный лучший результат минимальных значений контактного сопротивления $R_к$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценка возможности и целесообразности применения промежуточных ЖМ-сред в скользящих электрических контактах проводилась по двум критериям: сохранности жидкого металла на твердых контактных поверхностях при сдвиге зонда с последующей стабильностью ЖМ-покрытия при фрикционном взаимодействии в скользящем контакте; наименьшему диапазону значений контактного сопротивления $R_к$. На основании этих критериев давалась итоговая оценка пригодности того или иного

метода образования ЖМ-покрытия для обеспечения функциональных свойств промежуточной ЖМ-среды как компонента трибосистемы скользящего ЖМК. Результаты исследований приведены в табл. 2.

Таблица 2. Сравнительный анализ галлийсодержащих ЖМ-покрытий

Метод получения ЖМ-покрытия	Диапазон $R_к$, 10^{-3} Ом	Оценка сохраняемости при сдвиге зонда	Пригодность для скользящего ЖМК
Гальваническое осаждение	195…973	Хорошая	Плохая
Предварительное лужение	0,343…18,6	Хорошая	Удовлетворительная
Смачивание жидким металлом	0,359…0,771	Удовлетворительная	Удовлетворительная
Механическая обработка под жидким металлом	0,299…0,331	Хорошая	Хорошая

Хорошее с точки зрения адгезии и сохранности при фрикционном взаимодействии качество ЖМ-покрытия, образованного на твердой поверхности гальваническим осаждением галлия и использованием материала-посредника, хорошо взаимодействующего с галлием, полностью нивелировалось высоким и, что самое главное, неустойчивым контактным сопротивлением $R_к$.

Неплохие с точки зрения низких значений контактного сопротивления $R_к$ результаты смачивания галлием и его эвтектическими сплавами твердой поверхности при статическом взаимодействии давали при относительном сдвиге кратковременный эффект сохраняемости ЖМ-покрытия, которое интенсивно изнашивалось вплоть до потери в ряде режимов трения адгезии с твердой поверхностью и полного разрушения покрытия. При оптимальных для ЖМ-покрытия режимах трения наблюдался и двухкратный рост контактного сопротивления $R_к$, что недопустимо при эксплуатации скользящих электрических контактов.

Вывод о хорошей пригодности для скользящих электрических контактов ЖМ-покрытий на основе галлия и его эвтектических сплавов, полученных при механической обработке твердой поверхности контакт-деталей под слоем жидкого металла, был в дальнейшем подтвержден при изучении фрикционных характеристик скользящих контактов с промежуточной ЖМ-средой.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в тесном сотрудничестве с коллективом кафедры прикладной физики Тверского государственного технического университета. Отдельную благодарность выражаем профессору, доктору технических наук Измайлову Владимиру Васильевичу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Guo J., Cheng J., Tan H., Zhu SY., Qiao ZH., Yang J., Liu W. Ga-based Liquid Metal: A Novel Current-carrying Lubricant // *Tribology International*. 2019. V. 135. P. 457−462.

2. Мышкин Н.К., Кончиц В.В., Браунович М. Электрические контакты. Долгопрудный: Интеллект. 2008. 560 с.

3. Klaudy P. Eigenchaften und Anwendungsmöglichkeiten von Flüssigkeitskontakten // *Elekrotechnische Zeitschrift*. 1955. V. 76. № 15. S. 525−532.

4. Klaudy P. Ein neuer Flüssigkeitsrollkontakt und sein möglich Verwendung im Hochleistungselektromaschinenbau // *Elekrotechnik und Maschinenbau*. 1972. V. 89. № 11. S. 440−445.

5. Митюрев А.А. Исследование электрической проводимости промежуточной жидкометаллической среды скользящих электрических контактов // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки».* 2023. № 1 (17). С. 5–10.

6. Митюрев А.А. Фрикционные и электрические характеристики жидкометаллических контактов при граничном трении. Дисс. … канд. техн. наук. Тверь. 1992. 253 с.

7. Измайлов В.В., Митюрев А.А. Трибологические аспекты применения жидкометаллической межконтактной среды в электрических контактах // *Трение и износ*. 1995. Т. 16. № 6. С. 1133−1143.

8. Li Y., Zhang S.W., Ding Q., Feng D.P., Qin B.F., Hu L.T. Liquid metal as novel lubricant in a wide temperature range from −10 to 800 °C // *Materials Letters*. 2018. V. 215. P. 140–143.

9. Дегтярь В.Г. Разработка основ теории и синтеза жидкометаллических контактов и контактных устройств. Дисс. … д-ра техн. наук. М. 1990. 421 с.

10. Гальванотехника: справочник / Ф.Ф. Ажогин [и др.]. М.: Металлургия. 1987. 736 с.

Для цитирования: Митюрев А.А. Некоторые закономерности применения промежуточных жидкометаллических сред в скользящих электрических контактах // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2023. № 1 (17). С. 11–18.

SOME REGULARITIES OF APPLICATION OF INTERMEDIATE LIQUID METALLIC MEDIA IN SLIDING ELECTRIC CONTACTS

A.A. MITYUREV, Cand. Sc.

Tver State Technical University,
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, Russian Federation, e-mail: and.mit@westa69.ru

The description is given of the installation design based on the device for microhardness measuring PMT-3 for studying the frictional and electrical characteristics of sliding contacts with an intermediate liquid-metal (LM) medium for electrical machines and apparatuses. The setup makes it possible to evaluate the frictional stability of the LM coating under the relative shear of solid contact parts, to determine the contact electrical resistance of intermediate LM media in the temperature range 20…250 °C. The comparative analysis of the possibility of using LM coatings formed on solid contact parts by various methods for sliding electrical contacts has been carried out. The advantage of an LM coating based on gallium and its eutectic alloys, obtained by mechanical processing of a solid surface of a contact part under a layer of liquid metal, has been proved.

Keywords: sliding electrical contact, friction, wear, liquid metal contact, gallium, eutectic alloy, contact resistance.

Поступила в редакцию/received: 05.09.2022; после рецензирования/revised: 16.10.2022; принята/accepted: 02.11.2022