

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621.891: 621.313.04

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОВОДИМОСТИ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ СРЕДЫ СКОЛЬЗЯЩИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ

А.А. МИТЮРЕВ, канд. техн. наук

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

© Митюрёв А.А., 2023

Приведено описание конструкции шестипозиционного стенда из моделей жидкометаллических контактов (ЖМК) П. Клауди с целью исследования промежуточных жидкометаллических сред на основе галлия и его эвтектических сплавов для скользящих электрических контактов. Стенд позволяет определять переходное электрическое сопротивление контакта жидких металлов с основными электротехническими материалами (медь, латунь Л63, никель, сталь 12Х18Н10Т и др.) при температуре 20...250 °С. Предложена методика расчета удельного переходного сопротивления контакта жидкий металл – твердый электрод. Экспериментально доказаны целесообразность и эффективность для ЖМК предварительной механической обработки поверхностей твердых контакт-деталей под слоем жидкого металла.

*Ключевые слова:* скользящий электрический контакт, жидкометаллический контакт, граничное трение, изнашивание, галлий, эвтектический сплав, переходное электрическое сопротивление.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2023-1-5-10**

### ВВЕДЕНИЕ

Электрические скользящие контакты являются распространенным видом фрикционных узлов и сложной трибосистемой. К этим контактам предъявляют ряд специфических, характерных только для них требований, связанных с их назначением и условиями эксплуатации. Достижение высокой электрической проводимости и низкого переходного электрического сопротивления выступает одной из главных задач обеспечения надежности и эффективности электроконтактных соединений, особенно в аппаратах по коммутации больших по величине токов (десятки и сотни килоампер), которые в настоящее время широко применяются в промышленном электролизе для производства важнейших металлов (алюминия, магния и др.), газов (водорода, кислорода, хлора и пр.), в униполярных генераторах, ускорителях элементарных частиц, сверхпроводящих системах и др. Этим объясняется возросший интерес к новым композиционным материалам, получаемым методами порошковой металлургии. Указанные материалы представляют собой прочный и износостойкий твердометаллический каркас, пропитанный либо твердым электроконтактным материалом (например, медью) [1, 2], либо жидким металлом (допустим, галлием или эвтектическими сплавами на его основе).

Как показали предварительные исследования [3–10] галлийсодержащих промежуточных сред для жидкометаллических контактов (ЖМК), контакт жидкий металл – поверхность твердой детали во многом определяет основные электрические функциональные и эксплуатационные характеристики реального электрического аппарата. Важность этой составляющей возрастает при использовании ЖМК в качестве скользящего контакта при граничном трении, так как без надежной работоспособности именно электрического контакта может быть потеряно функциональное назначение всей электрической трибосистемы в целом. Следовательно, для проектирования и эксплуатации скользящих электрических контактов с применением промежуточных жидкометаллических (ЖМ) сред или скользящих композиционных ЖМК очевидно, что совершенно недостаточно изучения только фрикционных характеристик галлийсодержащих материалов при жидкостном или граничном трении [11–13]. Поэтому целью настоящей работы было исследование особенностей электрической проводимости границы жидкий металл – поверхность твердой контакт-детали с созданием методики расчета удельного переходного электрического сопротивления различных по соотношению материалов контактов жидкий металл – твердый электрод.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Особенности электрической проводимости ЖМК изучались на классической модели П. Клауди [3, 4], представляющей собой два разделенных жидким металлом твердометаллических цилиндра с фиксированными размерами твердого и жидкого электрических проводников.

По схеме П. Клауди был разработан шестипозиционный стенд ЭК-6КМ (рис. 1) для изучения временной зависимости удельного переходного сопротивления  $\chi$ , то есть переходного сопротивления единицы площади поверхности контакта жидкий металл – твердый электрод.

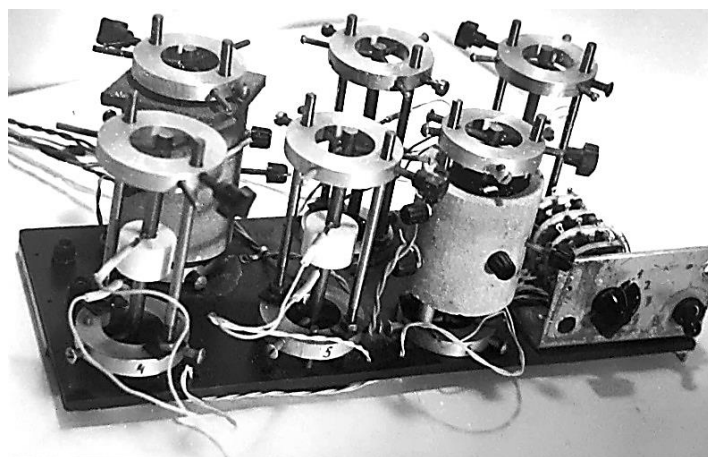


Рис. 1. Внешний вид стенда ЭК-6КМ

Стенд ЭК-6КМ состоит из шести моделей ЖМК, закрепленных на общей изоляционной станине и электрически соединенных последовательно. Каждая модель ЖМК включает в себя цилиндрические образцы диаметром  $d = 6$  мм (нижний образец на схеме обозначен цифрой 1, верхний – 2) (рис. 2). Нижний образец закреплен тремя центровочными винтами в нижней обойме 3, к которой подведен токовый провод. В верхней части нижнего образца прессовой посадкой закреплено изоляционное кольцо 4 из фторопласта. Верхний образец закреплен тремя центровочными винтами в верхней обойме 5, которая установлена на двух стойках 6 с подведением к одной из них

ответного токового провода. Изоляционные втулки 7 электрически разделяют верхнюю и нижнюю обоймы. К верхнему и нижнему образцам на фиксированном расстоянии  $\ell_1 = \ell_2 = 4$  мм, которое контролировалось с помощью микроскопа, подведены потенциальные провода, ограничивающие длину твердометаллических электрических проводников. Верхний образец фиксировался на скользящую посадку в изоляционном кольце 4 при монтаже модели ЖМК после заливки в отверстие кольца жидкого металла 8. Высота  $L = 12$  мм изоляционного кольца контролировалась микрометром.

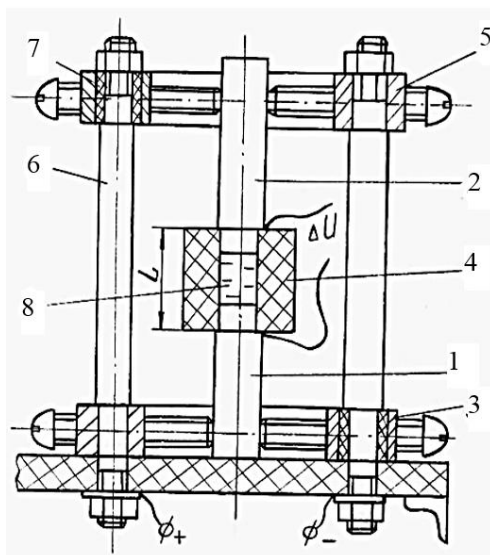


Рис. 2. Схема модели ЖМК П. Клауди на стенде ЭК-6КМ

Длина  $\ell_{жм}$  ЖМ-проводника после монтажа каждой модели ЖМК определяли по выражению

$$\ell_{жм} = L - (\ell_1 + \ell_2).$$

На стенде ЭК-6КМ предусмотрены электрические нагреватели с рабочим диапазоном температур 20...250 °С. Для исследований при повышенных температурах фторопластовые изоляционные кольца должны быть заменены на керамические из-за сильной деформации первых при нагревании.

При пропускании постоянного тока в диапазоне  $I = 1...5$  А на каждой модели ЖМК определялось контактное падение напряжения  $\Delta U$ . Компенсацию термо-ЭДС осуществляли проведением измерений при прямом и обратном направлениях тока.

Исследовали основные электротехнические материалы (медь, латунь Л63, никель, сталь 12Х18Н10Т) в контакте с галлием и эвтектиками на его основе.

Удельное переходное сопротивление  $\chi_i$  одного контакта жидкий металл – твердый электрод находили по формуле

$$\chi_i = R_{пер i} \cdot A_n,$$

где  $R_{пер i} = \frac{R_{пер i}^{общ}}{2}$  – переходное сопротивление одного контакта жидкий металл – твердый электрод ( $R_{пер i}^{общ}$  – общее переходное сопротивление  $i$ -й модели ЖМК);  $A_n = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$  – номинальная площадь круглого контакта жидкий металл – твердый электрод.

Общее переходное сопротивление  $R_{\text{пер}i}^{\text{общ}}$  рассчитывали по формуле

$$R_{\text{пер}i}^{\text{общ}} = R_k - (R_1 + R_2) - R_{\text{ЖМ}},$$

где  $R_k = \frac{\Delta U}{I}$  – контактное сопротивление  $i$ -й модели ЖМК;  $R_{1,2} = \frac{4 \cdot \rho_{\text{ТВ}} \cdot \ell_{1,2}}{\pi \cdot d^2}$  – собственное омическое сопротивление твердометаллических проводников из образцов 1 и 2 ( $\rho_{\text{ТВ}}$  – удельное сопротивление материала твердометаллических проводников);  $R_{\text{ЖМ}} = \frac{4 \cdot \rho_{\text{ЖМ}} \cdot \ell_{\text{ЖМ}}}{\pi \cdot d^2}$  – собственное омическое сопротивление ЖМ-проводника ( $\rho_{\text{ЖМ}}$  – удельное сопротивление материала ЖМ-проводника) [5, 6, 10].

Тогда удельное переходное сопротивление  $\chi_i$  одного контакта жидкий металл – твердый электрод можно найти по выражению

$$\chi_i = \frac{\pi \cdot d^2}{8 \cdot I} \cdot \Delta U - \frac{\rho_{\text{ТВ}} \cdot (\ell_1 + \ell_2) + \rho_{\text{ЖМ}} \cdot \rho_{\text{ЖМ}}}{2}.$$

На основании этого выражения по шести моделям ЖМК на стенде ЭК-6КМ можно определить среднее значение удельного переходного сопротивления  $\chi$  различных по соотношению материалов контактов жидкий металл – твердый электрод:

$$\chi = \frac{1}{6} \sum_1^6 \chi_i.$$

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования позволили выявить некоторые пути управления процессами на границе жидкого и твердого металлов с целью уменьшения их влияния на электрические свойства ЖМК. Было отмечено, что проведение и совершенствование мероприятий по предварительной подготовке контактирующей поверхности твердых контакт-деталей под слоем жидкого металла позволяет уменьшить переходное сопротивление  $R_{\text{ЖТ}}$  в ЖМК до 67 %, в то время как последующие внешние воздействия на ЖМК за счет повышения температуры увеличивает  $R_{\text{ЖТ}}$  до 16 %, а за счет временного фактора уменьшает  $R_{\text{ЖТ}}$  до 40 %, то есть относительно неблагоприятным может считаться только температурное воздействие.

Уменьшение переходного сопротивления  $R_{\text{ЖТ}}$  со временем доказывает, что ресурсы предварительной подготовки контактирующей поверхности твердых контакт-деталей под слоем жидкого металла перед организацией ЖМК окончательно не исчерпаны и могут продолжать совершенствоваться. Предполагается, что удаление инородных слоев с твердой поверхности электрического контакта под слоем жидкого металла в определенной степени препятствует прямому воздействию окружающей среды на границу раздела двух фаз и может существенно увеличить проводимость контакта.

Экспериментальное исследование существующих методов обработки твердых поверхностей под слоем жидкого металла выявило невысокую их эффективность и привело к выводу, что существенное уменьшение переходного сопротивления  $R_{\text{ЖТ}}$  с сохранением физико-механических свойств материалов, составляющих ЖМК, и с минимальными изменениями микрогеометрии поверхности твердой контакт-детали может быть достигнуто в процессе обработки контактной поверхности под слоем жидкого металла со снятием микростружки. Это было реализовано на образцах стенда ЭК-6КМ (таблица).

Значения сопротивления ЖМК до и после обработки со снятием микростружки под слоем жидкого металла (числитель – до, знаменатель – после обработки)

Материалы ЖМК	Cu-Ga-Cu	Л63-Ga-Л63	12X18H10T-Ga-12X18H10T
Теоретическое омическое сопротивление $R_{теор}$ , $10^{-6}$ Ом	42,10±5,47	57,41±5,17	58,63±5,27
Экспериментальное сопротивление $R_{эксп}$ , $10^{-6}$ Ом	$\frac{42,93±9,19}{41,96±3,18}$	$\frac{342,17±51,83}{56,86±6,75}$	$\frac{2961,64±737,16}{481,00±87,00}$
Удельное переходное сопротивление $\chi$ , $10^{-10}$ Ом·м <sup>2</sup>	$\frac{0,116±0,008}{\rightarrow 0}$	$\frac{0,040±0,006}{\rightarrow 0}$	$\frac{59,1±8,9}{1,25\mp 0,10}$

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Уменьшение удельного переходного сопротивления контакта жидкий металл – поверхность твердой контакт-детали до значений, близких к нулевым, показало целесообразность и эффективность предварительной обработки поверхностей твердых контакт-деталей со снятием микростружки под слоем жидкого металла для скользящих электрических контактов и электрокоммутирующих устройств, основанных на использовании промежуточных ЖМ-сред.

### БЛАГОДАРНОСТИ

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

### ЛИТЕРАТУРА

1. Измайлов В.В., Новоселова М.В. Электроконтактные свойства материала, содержащего тугоплавкие компоненты. Композит медь – карбид хрома // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2021. № 2 (10). С. 15–20.
2. Измайлов В.В., Новоселова М.В. Электроконтактные свойства материала, содержащего тугоплавкие компоненты. Композит медь – карбид вольфрама // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2021. № 3 (11). С. 5–11.
3. Klaudy P. Eigenschaften und Anwendungsmöglichkeiten von Flüssigkeitskontakten // *Elektrotechnische Zeitschrift*. 1955. V. 76. № 15. S. 525–532.
4. Klaudy P. Ein neuer Flüssigkeitsrollkontakt und sein möglich Verwendung im Hochleistungselektromaschinenbau // *Elektrotechnik und Maschinenbau*. 1972. V. 89. № 11. S. 440–445.
5. Дегтярь В.Г., Вячкис В.В. Жидкометаллические контакты. Обзорная информация. М.: Информэлектро. 1980. 64 с.
6. Дегтярь В.Г., Нестеров Г.Г. Контактные коммутирующие устройства электрических аппаратов низкого напряжения. М.: ВИНТИ. 1980. Т. 2. 100 с.
7. Митюрёв А.А. Изучение переходного контактного электросопротивления жидкометаллических контактов. *Фрикционный контакт деталей машин: Сборник научных трудов*. Калинин: КПИ. 1989. С. 69–75.

8. Митюрёв А.А. Фрикционные и электрические характеристики жидкометаллических контактов при граничном трении. Дисс. ... канд. техн. наук. Тверь. 1992. 253 с.

9. Дегтярь В.Г. Жидкометаллические контакты и контактные устройства в современных условиях. *Электрические контакты-2002: Сборник докладов международной конференции*. СПб. 2002. С. 166–172.

10. Беляев В.Л. Особенности работы и конструкции многоамперных электрических аппаратов. СПб.: СЗТУ. 2005. 274 с.

11. Li H.J., Tian P.Y., Lu H.Y., Jia W.P., Du H.D., Zhang X.J., Li Q.Y., Tian Y. State-of-the-Art of extreme pressure lubrication realized with the high thermal diffusivity of liquid metal // *ACS applied materials & interfaces*. 2017. V. 9. № 6. P. 5638–5644.

12. 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.

13. 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.

14. Митюрёв А.А. Исследование характеристик галлийсодержащих материалов для скользящих электрических контактов с промежуточной жидкометаллической средой // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2022. № 4 (16). С. 17–24.

**Для цитирования:** Митюрёв 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.

## **STUDY OF ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF INTERMEDIATE LIQUID METALLIC MEDIUM OF SLIDING ELECTRICAL 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 design of a 6-position stand contained the models of liquid-metal contacts (LMC) by P. Claudi for the study of intermediate liquid-metal media based on gallium and its eutectic alloys for sliding electrical contacts. The stand allows to determine the transition electrical resistance of the contact of liquid metals with basic electrical materials (copper, brass L63, nickel, 12Kh18N10T steel, etc.) in the temperature range 20...250 °C. A method for calculating the specific contact resistance of a liquid metal–solid electrode contact is proposed. The expediency and efficiency of preliminary mechanical treatment of surfaces of solid contact parts under a layer of liquid metal has been experimentally proven.

*Keywords:* sliding electrical contacts, liquid metal contact, boundary friction, wear, gallium, eutectic alloy, transient electrical resistance.

Поступила в редакцию/received: 27.07.2022; после рецензирования/revised: 08.09.2022;  
принята/accepted: 15.09.2022