

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 537.311.4

К РАСЧЕТУ ПРОВОДИМОСТИ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ С ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ СРЕДОЙ

В.В. ИЗМАЙЛОВ, д-р техн. наук, А.А. МИТЮРЕВ, канд. техн. наук

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

© Измайлов В.В., Митюрёв А.А., 2023

Приведены результаты теоретического и экспериментального исследования контактного взаимодействия контакт-деталей электрических аппаратов через промежуточную жидкометаллическую (ЖМ) среду на основе галлия и его эвтектических сплавов. Исследованы ЖМ-среды, предназначенные для неподвижных и скользящих электрических контактов и имеющие следующие составы (в % по массе): GaIn (77,5 % Ga / 22,5 % In); GaInSn (62 % Ga / 25 % In / 13 % Sn). Получена формула для расчета контактного сопротивления жидкометаллических контактов (ЖМК) с учетом параметров микрогеометрии шероховатой поверхности контакт-деталей и номинального контактного давления для пластического и упругого контактов. Дано описание конструкции установки для исследования электрической проводимости контакта шероховатых поверхностей через промежуточную ЖМ-среду. Сравнение теоретических и экспериментальных величин электрического сопротивления ЖМК показало их удовлетворительное соответствие.

Ключевые слова: микрогеометрия поверхности, параметры шероховатости, электрический контакт, жидкометаллический контакт, контактное электрическое сопротивление.

DOI: 10.46573/2658-5030-2023-2-5-15

ВВЕДЕНИЕ

Жидкометаллические композиционные сплавы – многофункциональные материалы, обладающие уникальными физико-химическими свойствами и имеющие перспективы широкого применения, включая робототехнику, аэрокосмическую и атомную технику, установки по электролизу и электрохимии, ускорители элементарных частиц, сверхпроводящие системы, мощные коммутационные аппараты и пр.

Одно из перспективных направлений применения таких материалов – электроконтактные устройства различного назначения. Через коммутационные электротехнические устройства (неподвижные и скользящие электрические контакты) проходит существенная доля используемой в мире электроэнергии. Даже незначительное снижение уровня электрических и механических потерь в данных устройствах эквивалентно огромной экономии энергоресурсов. Кроме того, от надежности электроконтактных устройств в значительной степени зависит надежность электротехнического оборудования и всей энергосистемы в целом.

Создание новых композиционных и легкоплавких материалов, разработка и совершенствование теории и практики использования жидкометаллических

контактных устройств позволяют существенно расширить их применение. Жидкометаллические контакты (ЖМК) обладают очень малым и стабильным переходным электрическим сопротивлением, хорошими возможностями охлаждения электроконтактных узлов, не подвержены свариванию и залипанию, влиянию вибрации, могут работать при высоких температурах и в высоком вакууме. Малое контактное нажатие позволяет упростить приводные механизмы и снизить износ контакт-деталей.

Очевидные эксплуатационные достоинства ЖМК обусловили возродившийся в последнее время после некоторого спада научный и практический интерес к таким устройствам [1–5]. Тем не менее необходимы комплексные теоретические и экспериментальные исследования фрикционных и электрических характеристик ЖМК как элементов трибосистем, к которым относятся скользящие и статические электроконтактные соединения.

Цель данной работы – теоретический и экспериментальный анализ факторов, определяющих одну из основных эксплуатационных характеристик, обеспечивающих качество и надежность ЖМК, а именно контактное электросопротивление. Теоретические зависимости для расчета контактного электросопротивления позволяют выделить ключевые факторы и наметить пути достижения оптимальных эксплуатационных характеристик ЖМК.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

Процессы контактного взаимодействия, в том числе трение, изнашивание и контактная проводимость, в значительной степени зависят от микрогеометрии контактирующих поверхностей [6, 7].

Одной из важных характеристик микрогеометрии шероховатой поверхности является кривая коэффициента смятия профиля, или кривая Эбботта – Файрстоуна (ГОСТ Р ИСО 4287-2014), которую часто называют опорной кривой профиля. Она характеризует распределение материала по высоте шероховатого слоя. В случае электрического контакта с промежуточной жидкометаллической (ЖМ) средой опорная кривая профиля характеризует, наряду с распределением материала шероховатого слоя твердой контакт-детали, распределение жидкого металла в объеме межконтактного пространства (рис. 1).

Участок опорной кривой до средней линии профиля можно аппроксимировать уравнением Н.Б. Демкина [8]:

$$\frac{A_r}{A_n} = \alpha \cdot t_m \cdot \left(\frac{y}{R_p}\right)^{\nu}, \quad (1)$$

где A_r и A_n – фактическая и номинальная площади контакта; α – коэффициент, зависящий от характера контактной деформации (принимают равным 1 для пластического контакта и 0,5 – для упругого контакта; для упругопластического контакта $0 < \alpha < 1$); t_m – коэффициент смятия профиля (относительная опорная длина профиля) на уровне средней линии; y – координата, отсчитанная от линии выступов профиля (рис. 1а); R_p – максимальная высота выступа (пика) профиля; ν – эмпирический показатель степени опорной кривой.

Воспользовавшись понятием эквивалентной шероховатости [8], далее будем рассматривать контакт шероховатой поверхности с гладкой (рис. 2а). Межконтактный зазор заполнен жидким металлом.

При отсутствии контактного нажатия (нормальной силы), согласно определению средней плоскости шероховатости, объем межконтактного зазора и, соответственно, жидкого металла можно найти по выражению

$$V_l = A_n \cdot R_p.$$

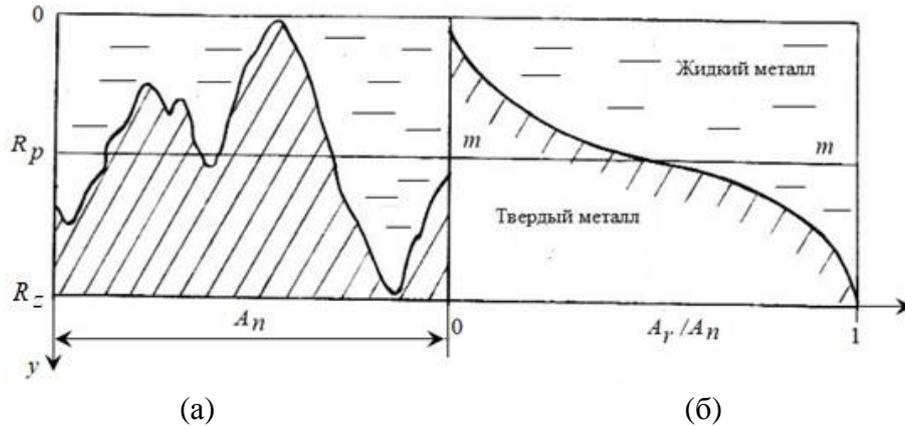


Рис. 1. Профилограмма (а) и опорная кривая (б) шероховатой поверхности с промежуточной ЖМ-средой: $m-m$ – средняя линия шероховатости

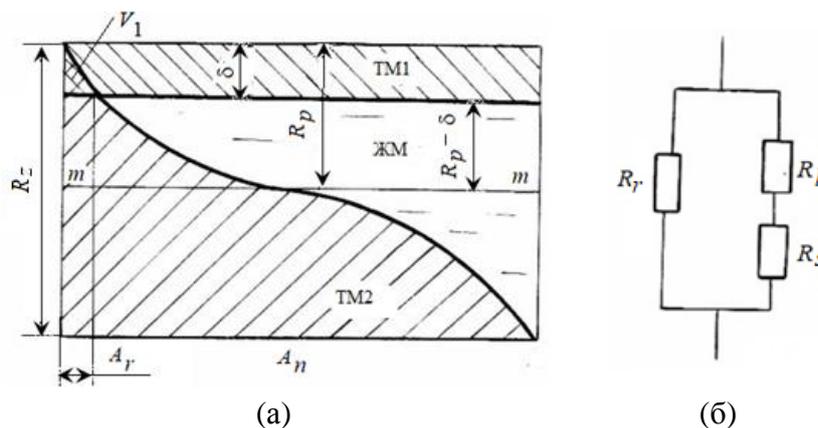


Рис. 2. Схема контакта шероховатых поверхностей с ЖМ-средой (а) и его электрическая схема замещения (б):

TM1 и TM2 – материал твердометаллических контакт-деталей;
 ЖМ – жидкометаллическая среда; R_r – эквивалентное сопротивление площадок фактического контакта выступов (пиков) шероховатости;
 R_l – омическое сопротивление промежуточной ЖМ-среды;
 R_s – омическое сопротивление твердометаллических контакт-деталей в шероховатом слое

Под влиянием приложенной к контакту нормальной нагрузки выступы (пики) микронеровностей деформируются и твердые поверхности сближаются на величину δ (см. рис. 2а). При этом объем твердого металла, вовлеченного в деформацию шероховатого слоя, равен V_1 (см. рис. 2а). При пластическом контакте $V_1 = 0$, так как сплошная среда считается несжимаемой. При упругом контакте объем деформированного материала (твердого металла) найдется интегрированием уравнения (1):

$$V_1 = \int_0^\delta A_r(y) dy = \frac{\alpha \cdot t_m \cdot A_n \cdot R_p}{(\nu + 1)} \cdot \left(\frac{\delta}{R_p}\right)^{\nu+1}.$$

Как показывают расчеты, типичная величина V_1 для реальных контактных соединений составляет порядка 1 % от объема зазора, поэтому на основании рис. 2а для оценки величины межконтактного зазора, заполненного жидким металлом, можно записать приближенное выражение

$$V_l = A_n \cdot R_p \cdot (1 - \varepsilon), \quad (2)$$

где $\varepsilon = \delta / R_p$ – относительная деформация контакта.

Общий объем шероховатого слоя – от дна самой глубокой впадины профиля до вершины самого высокого выступа (пика) шероховатости – составляет

$$V = A_n \cdot R_z,$$

где R_z – максимальная высота профиля по ГОСТ Р ИСО 4287-2014.

Тогда объем, занятый твердометаллическим материалом:

$$V_l = V - V_l = A_n \cdot R_z - A_n \cdot R_p \cdot (1 - \varepsilon) = A_n \cdot R_z \cdot (1 - \beta + \beta \cdot \varepsilon), \quad (3)$$

где $\beta = R_p / R_z$.

Учитывая, что проводимость площадок контакта выступов шероховатости много меньше проводимости сплошной среды, т. е. считая $R_r \gg R_l + R_s$ (см. рис. 2б), можно принять переходное сопротивление контакта $R_{пер}$ равным сумме сопротивлений жидкого металла R_l в межконтактном зазоре и твердометаллического материала шероховатого слоя R_s :

$$R_{пер} = R_l + R_s, \quad (4)$$

где $R_l \approx \frac{\rho_2 \cdot V_l}{A_n^2}$, а $R_s \approx \frac{\rho_1 \cdot V_s}{A_n^2}$ (ρ_1 и ρ_2 – удельные сопротивления твердого и жидкого металлов соответственно).

Из уравнений (2)–(4) получаем

$$R_{пер} = \frac{\rho_1 \cdot R_z}{A_n} \cdot [1 - \beta + \beta \cdot \varepsilon + k \cdot \beta \cdot (1 - \varepsilon)], \quad (5)$$

где $k = \rho_2 / \rho_1$.

Введя обозначения $R_0 = \frac{\rho_1 \cdot R_z}{A_n}$ и $\Phi = [1 - \beta + \beta \cdot \varepsilon + k \cdot \beta \cdot (1 - \varepsilon)]$, уравнению (5) придадим простой вид:

$$R_{пер} = R_0 \cdot \Phi, \quad (6)$$

где R_0 – сопротивление монолитного слоя толщиной R_z твердометаллического материала с номинальной площадью контакта A_n и с удельным сопротивлением ρ_1 .

Величина относительного сближения контактирующих поверхностей ε зависит от номинального контактного давления [8]:

$$\varepsilon = \left(\frac{p_n}{\alpha \cdot t_m \cdot p_r} \right)^{\frac{1}{\nu}},$$

где p_n и p_r – номинальное и фактическое контактные давления соответственно.

При пластическом контакте фактическое давление постоянно и равно микротвердости $p_r = H$. При упругом контакте фактическое давление зависит от номинального, однако эта зависимость незначительна, поэтому и при упругом контакте величину фактического давления можно считать постоянной и рассчитывать по формуле [9, 10]

$$p_r \approx 0,3 \cdot E^* \cdot \sqrt{\frac{Ra}{r}}, \quad (7)$$

где E^* – эквивалентный модуль упругости материалов контактной пары; Ra – среднее арифметическое отклонение профиля по ГОСТ Р ИСО 4287-2014; r – средний радиус кривизны выступов (пиков) профиля шероховатости.

Рассчитанную по формуле (7) величину фактического давления p_r иногда называют упругой твердостью.

Критерием характера контактной деформации (упругая или пластическая) служит безразмерная величина [8]

$$\psi = \frac{E^*}{H} \cdot \sqrt{\frac{Ra}{r}}.$$

При $\psi < 1,2$ контакт считается преимущественно упругим, при $\psi > 35$ – преимущественно пластическим, в остальных случаях – упругопластическим. Отметим, что величина относительного номинального давления $p_n / p_r = A_r / A_n$ – не что иное, как относительная площадь фактического контакта твердометаллических компонентов контактной пары.

Характерный вид зависимости параметра Φ от относительного номинального давления показан на рис. 3 для пластического и упругого характеров контакта шероховатых поверхностей с жидкометаллической межконтактной средой. Представленные зависимости соответствуют следующим параметрам контакта: $\nu = 3$; $\beta = 0,5$; $k = 5$.

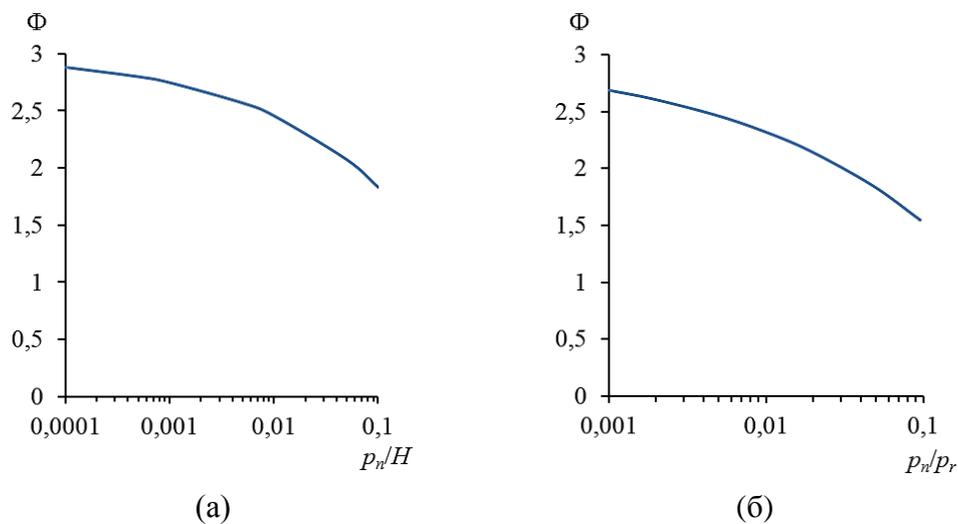


Рис. 3. Характерный вид зависимости параметра Φ от относительного номинального давления: пластический контакт (а); упругий контакт (б)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА, ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Экспериментальные исследования электрической проводимости контакта шероховатых поверхностей через промежуточную ЖМ-среду выполняли на экспериментальной установке (рис. 4).

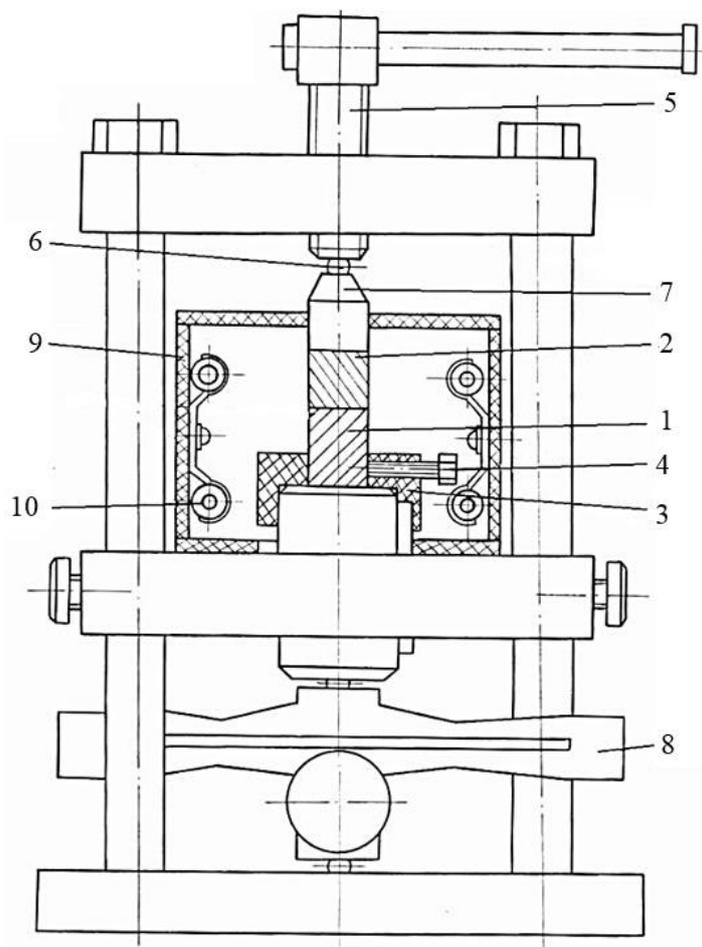


Рис. 4. Схема экспериментальной установки

Нижний образец 1 установлен на слюдяной прокладке в диэлектрической обойме 3 и зафиксирован винтом 4 (см. рис. 4). Нормальная нагрузка прикладывается к верхнему образцу 2 с помощью винта 5 через стальной шарик 6 и закаленный цилиндр 7 с шлифованным торцом, значение нагрузки фиксируется динамометром 8. Образцы 1 и 2 расположены внутри нагревательной камеры 9, снабженной электрическим нагревателем 10. Электрическое сопротивление контакта измеряли по четырехпроводной схеме по методу вольтметра-амперметра. Потенциальные электроды для измерения контактного падения напряжения закреплены в образцах 1 и 2 на расстоянии 3...5 мм от контактных поверхностей.

Температура образцов 1 и 2 в экспериментах изменялась в диапазоне $T = 30...180\text{ }^{\circ}\text{C}$ в соответствии с требованиями нормативных документов на температуру частей электрических аппаратов и контролировалась термопарой. Для компенсации термо-ЭДС измерения электрического сопротивления контакта проводились при двух противоположных направлениях тока.

Исследуемые образцы 1 и 2 были изготовлены из меди, никеля и латуни ЛС59-1, широко применяемых в электротехнике при изготовлении электрических аппаратов (табл. 1). Образцы представляли собой цилиндры высотой и диаметром 20 мм. Для обеспечения плоскостности и одинаковой шероховатости рабочих поверхностей образцов в одной серии их обработку проводили в дисковом приспособлении для одновременной подготовки на токарном станке шести пар образцов. Резцом наносилась необходимая шероховатость, типичная для торцевого точения или фрезерования.

Таблица 1. Характеристики экспериментальных образцов

Материал твердометаллических контакт-деталей	Микротвердость H , МПа	Модуль упругости E^* , ГПа	Шероховатость R_z , мкм
Медь М1	1 020	55	70...140
Никель НП2	1 950	100	70...100
Латунь ЛС59-1	1 650	55	35...130

В качестве промежуточных ЖМ-сред использовались эвтектика GaIn (77,5 масс. % Ga / 22,5 масс. % In; $T_{пл} = 15,8$ °C) с удельным электросопротивлением $\rho = 30,4$ мкОм·см (при 30 °C) и эвтектика GaInSn (62 масс. % Ga / 25 масс. % In / 13 масс. % Sn; $T_{пл} = 10,3$ °C) с удельным электросопротивлением $\rho = 33,6$ мкОм·см (при 30 °C).

Нанесение жидкого металла на шероховатые поверхности осуществлялось двумя методами: непосредственным смачиванием поверхности образцов жидким металлом и смачиванием предварительно нанесенного на поверхность образцов тонкого слоя металла-посредника (олова), хорошо взаимодействующего с галлием.

В первом случае рабочие поверхности обработанных торцевым точением образцов последовательно промывались бензином, ацетоном, этиловым техническим спиртом и протирались х/б тканью; удаление окисных пленок осуществлялось под слоем нагретого до кипения флюса (30 % канифоли, 70 % технического спирта).

Во втором случае предварительное лужение проводили с очисткой поверхности по вышеописанной методике, после образования покрытия олова толщиной 0,2...0,3 мм (определялось по привесу образцов) наносили жидкий металл. После получения жидкометаллического покрытия образцы под слоем жидкого металла нагревались до температуры $T = 250$ °C для лучшей адгезии ЖМ-покрытия и промывались в чистом жидком металле для удаления окисных пленок с ЖМ.

Измерение микротвердости материалов твердометаллических контакт-деталей проводили на микротвердомере ПМТ-3 в соответствии с ГОСТ 9450-76 (в редакции от 1993 г.).

Очевидно, что измеренная на экспериментальной установке по четырехпроводной схеме величина сопротивления контакта R_3 включает две составляющие:

$$R_3 = R_{пер} + R', \quad (8)$$

где $R_{пер}$ – переходное сопротивление контакта (определяемое, согласно ГОСТ 14312-79, эффективной площадью контактирования и равное отношению падения напряжения на контактном переходе к току через этот переход); R' – омическое сопротивление участков твердометаллических контакт-деталей между потенциальными проводами.

Значение R' для цилиндрических экспериментальных образцов находили из выражения

$$R' = \frac{4 \cdot \rho_1 \cdot l}{\pi \cdot d^2},$$

где ρ_1 – удельное электрическое сопротивление материала образца; l – расстояние между потенциальными проводами; d – диаметр образца.

Понятие переходного сопротивления $R_{\text{пер}}$ для контакта с промежуточной ЖМ-средой носит, в отличие от твердометаллического электрического контакта, несколько иной смысл и определяется сопротивлением непосредственно шероховатого слоя и жидкого металла в межконтактном зазоре, что и выражается формулой (6). При этом декларируемая ГОСТ 14312-79 трактовка величины $R_{\text{пер}}$ как отношения падения напряжения на контактном переходе к току через этот переход, безусловно, применима и к ЖМК.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Типичные зависимости сопротивления контакта от номинального контактного давления представлены на рис. 5 на примере твердометаллических контакт-деталей из латуни и никеля (см. табл. 1). Жидкометаллической промежуточной средой в первом случае служила эвтектика GaIn, во втором – GaInSn. Температура контакта в первом случае $65\text{ }^{\circ}\text{C}$, во втором – $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

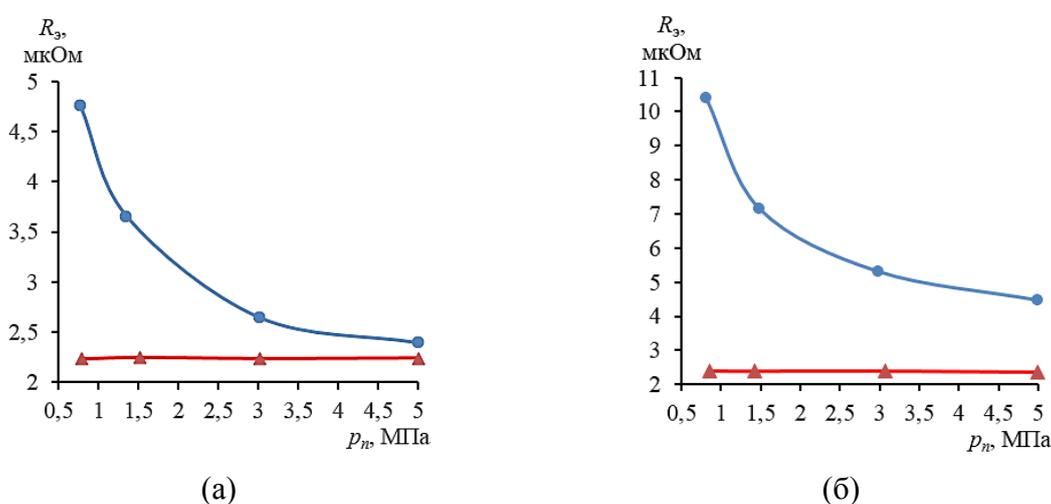


Рис. 5. Зависимость контактного электросопротивления от номинального контактного давления:

материал контакт-деталей: латунь ЛС59-1 (а); никель НП2 (б);

● – контакт без ЖМ-среды; ▲ – контакт с промежуточной ЖМ-средой

Обращает на себя внимание принципиальное отличие представленных на рис. 5 зависимостей контактного электросопротивления от нагрузки для контактов с ЖМ-средой и без нее. Во-первых, сопротивление контакта с промежуточной ЖМ-средой существенно меньше, чем без ЖМ-среды. Во-вторых, для ЖМК оно практически не зависит от усилия нажатия.

Теоретические значения сопротивления $R_{\text{пер}}$ рассчитаны по формуле (6), при этом значения R_0 рассчитаны для диапазона значений параметров шероховатости R_z из табл. 1 и соответствующих значений удельного сопротивления твердометаллических контакт-деталей ρ_1 . Значения параметра Φ рассчитаны в соответствии с формулой (5) и представлены в табл. 2. Как видно из табл. 2, в диапазоне номинальных контактных давлений $p_n = 0,5...5$ МПа величина параметра Φ меняется незначительно, что отмечалось ранее (см. рис. 3). Состав исследованных ЖМ-сред также мало влияет на величину параметра Φ из-за близких значений удельных сопротивлений эвтектик GaIn и GaInSn.

Таблица 2. Значения параметра Φ

Материал твердометаллических контакт-деталей	ЖМ-среда	Номинальное контактное давление p_n , МПа	Параметр Φ
Медь М1	GaIn	0,5	9,2
		5	8,6
	GaInSn	0,5	10,2
		5	9,6
Латунь ЛС 59-1	GaIn	0,5	2,8
		5	2,7
	GaInSn	0,5	3,0
		5	2,9
Никель НП2	GaIn	0,5	2,6
		5	2,5
	GaInSn	0,5	2,9
		5	2,8

Сравнение теоретических и экспериментальных значений сопротивления ЖМК представлено в табл. 3.

Поскольку экспериментально измеренные значения контактного электросопротивления R_3 включают в себя омическое сопротивление образцов между потенциальными проводниками R_0 (см. формулу (8)), значения $R_{пер}$ в табл. 3 рассчитаны по формуле

$$R_{пер} = R_3 - R_0.$$

Эксперименты подтвердили сделанный выше на основании теоретического анализа вывод о том, что контакты с промежуточной ЖМ-средой по сравнению с традиционными твердометаллическими контактами обладают меньшим сопротивлением, которое при этом практически не зависит от номинального давления p_n и, соответственно, от контактного нажатия.

Сравнение теоретических и экспериментальных значений электрического сопротивления контактов с промежуточной ЖМ-средой, представленных в табл. 3, показывает их вполне удовлетворительное соответствие. Тем не менее соответствующие экспериментальные значения электрического сопротивления в целом больше теоретических значений на 14...17%. Наиболее вероятная причина такого превышения – дополнительное поверхностное сопротивление границы раздела жидкой и твердых фаз, не учтенное в формуле (6). Источником такого сопротивления могут быть как пленки потускнения, так и интерметаллические соединения металлов твердых контакт-деталей с жидкометаллической средой.

Таблица 3. Теоретические и экспериментальные значения электрического сопротивления ЖМК

Материал контакт- деталей / ЖМ-среда	$R_{пер}$, нОм	
	Теоретические значения по формуле (6)	Экспериментальные значения
Медь М1 / GaIn	32,7...70,0	41,2...62,4
Медь М1 / GaInSn	36,5...77,5	37,8...53,7
Латунь ЛС 59-1 / GaIn	20,0...75,3	42,3...128,1
Латунь ЛС 59-1 / GaInSn	21,5...82,0	52,0...90,4
Никель НП2 / GaIn	39,0...58,0	23,6...79,0
Никель НП2 / GaInSn	43,2...63,8	23,7...86,9

В подтверждение вышесказанного можно привести результаты статьи [11]. Так, например, на границе медной контакт-детали с жидким галлием поверхностное сопротивление $\chi = 0,12 \cdot 10^{-10}$ Ом·м²; на границе латунной контакт-детали с жидким галлием $\chi = 0,04 \cdot 10^{-10}$ Ом·м². При номинальной площади контакта $A_n = 314$ мм² значения сопротивления граничных слоев $R_{гр} = \chi / A_n$ равны 38 и 12,7 нОм соответственно, что сравнимо с величинами $R_{пер}$.

Поверхностное сопротивление на межфазной границе жидкого и твердого металлов компонентов контактной пары свидетельствует о наличии резерва для снижения контактного сопротивления ЖМК путем его уменьшения или полного устранения. С этой точки зрения выражение (6) следует рассматривать как минимальную достижимую оценку электрической проводимости контакта с промежуточной ЖМ-средой, к которой следует стремиться при технологической операции подготовки поверхности твердых контакт-деталей электрических аппаратов. Пример такой операции приводится в статье [11].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Механические и физические процессы контактного взаимодействия в ЖМК обладают определенными особенностями по сравнению с традиционными контактными соединениями двух твердометаллических контакт-деталей без промежуточной жидкометаллической среды. Наличие проводящей среды, заполняющей межконтактный зазор, меняет природу контактного электросопротивления: вместо стягивания линий тока к малым площадкам фактического контакта, составляющим в сумме не более нескольких процентов от номинальной площади контакта, сопротивление ЖМК в основном обусловлено омическим сопротивлением компонентов ЖМК – как твердометаллических, так и жидкометаллических. Другим фактором, влияющим на проводимость жидкометаллического контактного соединения, является состояние поверхности контакт-деталей, а именно наличие поверхностных пленок потускнения. Сведение к минимуму поверхностного сопротивления межфазной границы жидкого и твердого металлических компонентов ЖМК позволяет снизить сопротивление жидкометаллического контактного соединения по сравнению с традиционными твердометаллическими контактными парами на порядок и более.

В целом ЖМК демонстрируют положительные качества, присущие неразъемным контактными соединениям – сварным и паяным, сохраняя при этом возможность разборки соединения и относительного перемещения контакт-деталей (скользящий контакт). Экспериментально и теоретически показана слабая зависимость сопротивления контактных соединений с промежуточной ЖМ-средой от номинального давления. Этот результат дает основание уменьшить величину контактных нажатий в скользящих ЖМК (по сравнению с традиционными токопроводящими фрикционными соединениями) без ущерба для их электрической проводимости. При этом существенно снижается трение и изнашивание твердых контакт-деталей, упрощается конструкция электроконтактного узла и увеличивается его срок службы. Кроме того, малая величина контактного сопротивления устраняет перегрев контактного соединения, значительно снижая пожароопасность электрооборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Основы теории электрических аппаратов / под ред. П.А. Курбатова. СПб.: Лань. 2021. 592 с.
2. State-of-the-Art of extreme pressure lubrication realized with the high thermal diffusivity of liquid metal / H.J. Li [et al.] // *ACS applied materials & interfaces*. 2017. V. 9. № 6. P. 5638–5644.

3. Liquid metal as novel lubricant in a wide temperature range from -10 to 800 °C / Y. Li [et al.] // *Materials Letters*. 2018. V. 215. P. 140–143.
4. Ga-based liquid metal: A novel current-carrying lubricant / J. Guo [et al.] // *Tribology International*. 2019. V. 135. P. 457–462.
5. Extreme pressure lubrication between ceramic and bearing steel with liquid metal / A. Xu [et al.] // *Tribology International*. 2022. V. 174. P. 107797.
6. Григорьев А.Я. Физика и микрогеометрия технических поверхностей. Минск: Беларуская навука. 2016. 247 с.
7. Уайтхауз Д. Метрология поверхностей. Принципы, промышленные методы и приборы. Долгопрудный: Интеллект. 2009. 472 с.
8. Измайлов В.В., Новоселова М.В. Контакт твердых тел и его проводимость: монография. Тверь: ТГТУ. 2010. 112 с.
9. Измайлов В.В., Курова М.С. Применение бета-распределения для расчета характеристик контакта твердых тел // *Трение и износ*. 1983. Т. IV. № 6. С. 983–990.
10. Попов В.Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. От нанотрибологии до динамики землетрясений. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2013. 352 с.
11. 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.

Для цитирования: Измайлов В.В., Митюрёв А.А. К расчету проводимости электроконтактных соединений с промежуточной жидкометаллической средой // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. № 2 (18). С. 5–15.

ON THE CALCULATION OF CONDUCTIVITY OF ELECTRICAL CONTACT JOINTS WITH INTERMEDIATE LIQUID METALLIC MEDIUM

V.V. IZMAILOV, Dr. Sc., A.A. MITYUREV, Cand. Sc.

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

The results of a theoretical and experimental study of the contact interaction of solid contact parts of electrical devices through an intermediate liquid metal (LM) medium based on gallium and its eutectic alloys are presented. LM-media intended for fixed and sliding electrical contacts and having the following compositions (% by mass are indicated): GaIn (77.5 % Ga / 22.5 % In); GaInSn (62 % Ga / 25 % In / 13 % Sn). A formula for calculating the contact resistance of liquid metal contacts (LMC) is obtained, taking into account the parameters of the microgeometry of the rough surface of the contact parts and the nominal contact pressure for plastic and elastic contacts. A description is given of the design of an installation for studying the electrical conductivity of rough surfaces through an intermediate LM-medium. Comparison of the theoretical and experimental values of the electrical resistance of the LMC showed their satisfactory agreement.

Keywords: surface microgeometry, roughness parameters, electrical contact, liquid metal contact, electrical contact resistance.

Поступила в редакцию/received: 10.01.2023; после рецензирования/revised: 27.01.2023;
принята/accepted: 03.02.2023