

particular cases of this more general relationship. On the basis of the analytical dependence describing the change in hardness with depth of the material, the J. Archard equation known in tribology for estimating the amount of wear is extended to the case of surface wear with a hardness gradient in depth. A formula was also obtained for predicting the resource of a friction joint according to the criterion of acceptable wear. A specific example of resource estimation in the form of a friction path value, on which the limiting value of linear wear is reached, is given. It is shown that ignoring the hardness gradient when estimating the service life of friction joint can lead to a significant error.

Keywords: friction, wear, surface hardening, hardness gradient, resource, prediction.

Поступила в редакцию/received: 20.06.2022; после рецензирования/revised: 26.08.2022;
принята/accepted: 09.09.2022

УДК 621.891: 621.313.04

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЛЛИЙСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СКОЛЬЗЯЩИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ С ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ СРЕДОЙ

А.А. МИТЮРЕВ, канд. техн. наук

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

© Митюрёв А.А., 2022

В статье приведено описание конструкций двух установок, использующихся при исследовании электрических характеристик жидких металлов на основе галлия и его эвтектических сплавов для жидкометаллических контактов электрических машин и аппаратов. Установки позволяют определять удельное электрическое сопротивление жидких металлов независимо от конструкции жидкометаллических узлов без образования интерметаллических соединений с галлием по ГОСТ 8024-90 в диапазоне температур 30...180 °С. Экспериментально подтвержден линейный характер температурной зависимости удельного электрического сопротивления $\rho = f(T)$ галлийсодержащих материалов для жидкометаллических контактов. Для этой температурной зависимости определены значения коэффициента удельного электрического сопротивления жидких металлов при температуре 30 °С и температурный коэффициент электрического сопротивления галлия и его эвтектических сплавов (% по массе) GI (77,5 % Ga, 22,5 % In); GIS (62 % Ga, 25 % In, 13 % Sn); GISZ (64 % Ga, 12 % In, 13 % Sn, 11 % Zn), которые применяются в современных многоамперных электрических аппаратах, в том числе композиционных жидкометаллических контактах.

Ключевые слова: скользящий электрический контакт, жидкометаллический контакт, граничное трение, изнашивание, галлий, эвтектический сплав, удельное электрическое сопротивление, температурная зависимость.

DOI: 10.46573/2658-5030-2022-4-17-24

ВВЕДЕНИЕ

За последние несколько десятилетий мощность электрического оборудования в металлургическом производстве, в частности электролизных установок, выросла более чем в 30 раз (в настоящее время может достигать более 1 000 МВт) с увеличением номинальных токов более чем в 20 раз (в настоящее время – до 150...200 кА). Подобные многоамперные электрические аппараты применяются при производстве алюминия, магния, цинка, кадмия, кобальта и других материалов, незаменимых в современном авиа- и судостроении, космической и оборонных отраслях, а также при образовании многих химических веществ, таких как водород, кислород, хлор, фтор, каустическая сода, электролизным способом. Во многих случаях оптимальным решением технологических проблем, связанных с эксплуатацией многоамперных аппаратов, является использование жидкометаллических контактов (ЖМК), поскольку у них есть очевидные и значительные преимущества по сравнению с традиционными твердометаллическими электрическими контактами [1]. Жидкометаллические контакты обладают очень малым переходным электрическим сопротивлением $R_{пер}$. Существенно, что при определенных материалах и технологиях изготовления ЖМК $R_{пер}$ может стремиться к нулю, поэтому они не подвержены перегреву и последующему свариванию. При этом эксплуатация ЖМК не зависит от контактного нажатия, что позволяет упростить и, соответственно, удешевить конструкции и приводные механизмы электрических аппаратов [1–5]. Особенно перспективным выглядит применение сильноточных композиционных ЖМК, представляющих собой пористый, прочный и износостойкий твердометаллический каркас, пропитанный или смоченный жидким металлом на основе галлия и его эвтектических сплавов [1, 3, 5–7]. Эксплуатация композиционных ЖМК не зависит от их положения в пространстве, поэтому они могут эффективно использоваться в качестве скользящих электрических контактов. При этом отсутствие в подобных ЖМК необходимости в контактном нажатии может предполагать низкие потери энергии на трение при относительном движении контакт-деталей, в том числе при высоких температурах и в вакууме [8–11]. Применение композиционных ЖМК в многоамперных аппаратах позволяет уменьшить контактное нажатие в 6...10 раз по сравнению с необходимым контактным нажатием в устройствах с медными контактами и в 3...6 раз в устройствах с серебряными контактами [3, 5].

Однако производство контактных устройств на основе скользящих ЖМК ограничено из-за практически полного отсутствия исследований трения, изнашивания и электрической проводимости таких контактов при граничном трении (т.е. взаимодействии материала твердометаллического каркаса композиционного ЖМК или твердых контакт-деталей через промежуточную жидкометаллическую (ЖМ) среду), а также отсутствия исследований фрикционных и электрических характеристик самой ЖМ-среды как компонента трибологической системы и их взаимного влияния.

Важной характеристикой промежуточной ЖМ-среды при проектировании ЖМК любого типа является удельное электрическое сопротивление ρ жидких металлов. Анализ данных по измерению ρ и температурного коэффициента электрического сопротивления α ЖМ-материалов на основе жидкого галлия при температуре плавления галлия $T_{пл} = 29,78$ °С приведен в табл. 1 [4, 12].

Таблица 1. Характеристики температурной зависимости электрического сопротивления галлия

Автор	$\rho, 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$	$\alpha, 10^{-5} \text{ град}^{-1}$
C.F. Powell	25,4	75,4
Г.И. Горяга	25,9	87
A. Roll	25,9	481
P.W. Bridgman	25,92	84
L.G. Shulz	25,84	77
N.E. Cusack	25,9	98
Б.Е. Семячкин	25,76	79
С.П. Яценко	25,8	79

Как следует из табл. 1, большинство значений удельного электрического сопротивления ρ жидкого галлия при температуре плавления приближаются к величине $25,8...25,9 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$, а температурный коэффициент электрического сопротивления α близок к значению $80 \cdot 10^{-5} \text{ град}^{-1}$.

Современные ЖМК могут работать в широком диапазоне температур до $800 \text{ }^\circ\text{C}$ [9] и использовать, помимо жидкого галлия, его эвтектические сплавы с более низкой температурой плавления от $4 \text{ }^\circ\text{C}$. В работах [4, 5, 12] установлен линейный характер температурной зависимости удельного электрического сопротивления ρ жидкого галлия и его эвтектических сплавов. Диапазоны полученных значений ρ при температурах от 30 до $500 \text{ }^\circ\text{C}$ указаны в табл. 2 [5].

Таблица 2. Температурная зависимость удельного электрического сопротивления галлия и его эвтектических сплавов

Состав сплава (% по массе)	$\rho, 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ (при температуре)
Галлий	26,0 ($40 \text{ }^\circ\text{C}$)
Галлий – индий (77,5/22,5)	23,6 ($30 \text{ }^\circ\text{C}$); 32,5 ($500 \text{ }^\circ\text{C}$)
Галлий – индий – серебро (74/24/2)	27,8 ($30 \text{ }^\circ\text{C}$); 40,0 ($500 \text{ }^\circ\text{C}$)
Галлий – индий – олово (62/25/13)	28,2 ($30 \text{ }^\circ\text{C}$); 37,3 ($500 \text{ }^\circ\text{C}$)

Представленные в табл. 2 данные удельного электрического сопротивления определялись на моделях ЖМК и в реальных электрических аппаратах с ЖМК, при этом на регистрируемое значение контактного падения напряжения ΔU могли оказывать влияние применяемые материалы и конструкция ЖМ-узла, а также проводимость соединения (контакта) «жидкий металл – контактная поверхность твердометаллической детали». Таким образом, целью настоящей работы являлось исследование температурной зависимости удельного электрического сопротивления галлийсодержащих материалов, необходимой для расчета эксплуатационных параметров многоамперных электрических аппаратов с ЖМК в условиях, не зависящих от конструкции ЖМК, с использованием в экспериментах материалов, которые не образуют с галлием интерметаллических соединений, способных оказать какое-либо влияние на проводимость промежуточной ЖМ-среды.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования температурной зависимости электрического сопротивления галлийсодержащих материалов были созданы две установки (рис. 1), принцип работы которых основан на регистрации контактного падения напряжения ΔU на вольфрамовых зондах, инертных к воздействию галлия и его эвтектических сплавов, при постоянном токе по четырехпроводной схеме по методу вольтметра – амперметра.

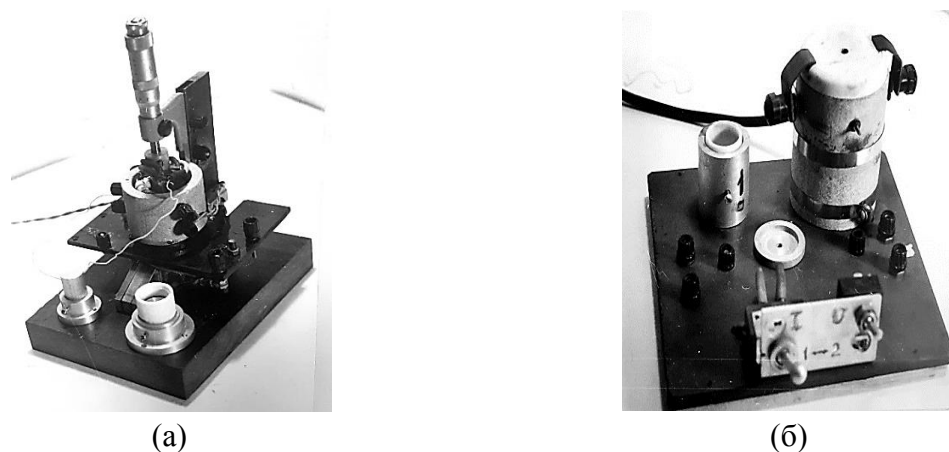


Рис. 1. Внешний вид установок для исследования температурной зависимости электрического сопротивления: УЭС-1 (а); УЭС-2ЛЧ (б)

В установке УЭС-1 (рис. 2) в стеклянной изоляционной трубке формировался ЖМ-проводник с фиксированными длиной и поперечным сечением.

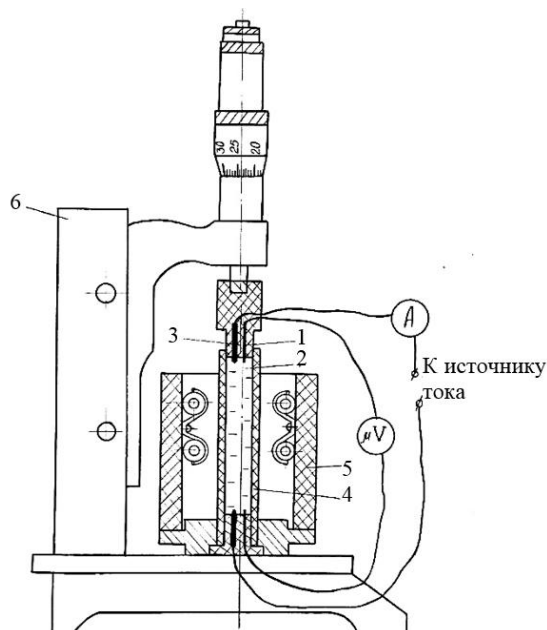


Рис. 2. Схема установки УЭС-1: 1 – жидкий металл; 2 – потенциальные зонды; 3 – токовые зонды; 4 – стеклянная изоляционная трубка; 5 – нагреватель; 6 – корпус установки

Удельное электрическое сопротивление определялось по формуле

$$\rho = \frac{\Delta U \cdot S}{I \cdot \ell}, \quad (1)$$

где ΔU – контактное падение напряжения; S – площадь поперечного сечения ЖМ-проводника; I – сила тока; ℓ – длина ЖМ-проводника, контролируемая микрометрическим винтом.

В установке УЭС-2ЛЧ (рис. 3) постоянное количество жидкого металла наливалось в два цилиндрических изоляционных сосуда, на дне которых располагались четыре зонда: в одном случае по линейной схеме, в другом – в виде четырехугольника.

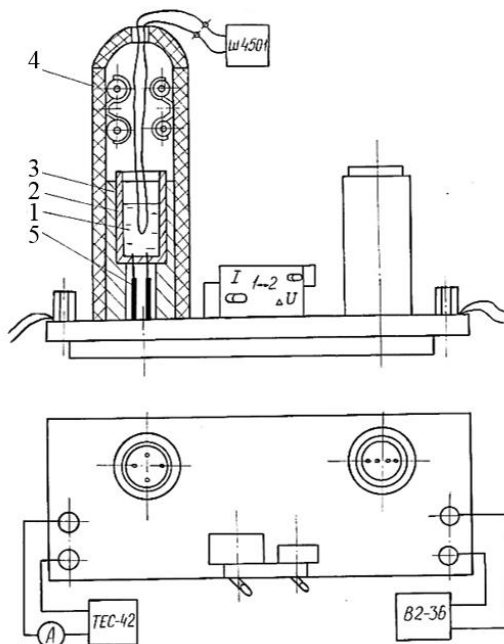


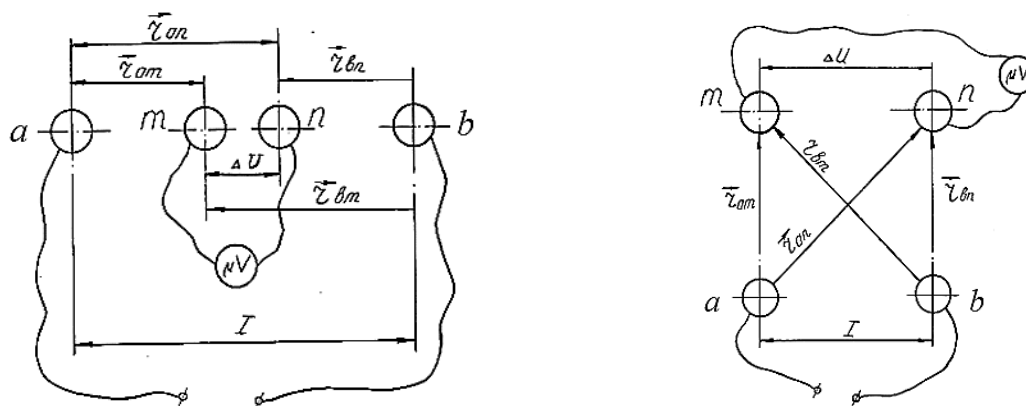
Рис. 3. Схема установки УЭС-2ЛЧ: 1 – жидкий металл; 2 – изоляционный стакан; 3 – держатель стакана; 4 – нагреватель; 5 – зонды

Удельное электрическое сопротивление определялось по формуле

$$\rho = G_1 \cdot G_2 \cdot \frac{\Delta U}{I}, \quad (2)$$

где G_1 – масштабный коэффициент, зависящий от соотношения W/B (W – высота столба жидкого металла; B – расстояние между зондами); G_2 – масштабный коэффициент, зависящий от расположения зондов.

Принципиальная схема измерений на установке УЭС-2ЛЧ показана на рис. 4.



(а) (б)

Рис. 4. Схемы измерений на установке УЭС-2ЛЧ:

линейное расположение зондов (а); в виде четырехугольника (б)

При произвольном расположении двух токовых $a-b$ (i_1, i_2) и двух потенциальных $m-n$ (u_1, u_2) зондов (см. рис. 4а) величина масштабного коэффициента G_2 определяется выражением

$$G_2 = \frac{r_{i_1 u_1} \cdot r_{i_2 u_2} \cdot r_{i_2 u_1} \cdot r_{i_1 u_2}}{(r_{i_1 u_2} - r_{i_1 u_1}) \cdot r_{i_2 u_1} \cdot r_{i_2 u_2} - (r_{i_2 u_2} - r_{i_2 u_1}) \cdot r_{i_1 u_1} \cdot r_{i_1 u_2}} \quad (3)$$

При расположении зондов в виде квадрата (см. рис. 4б) выражение (3) преобразуется к виду

$$G_2^{\square} = \frac{2 \cdot \pi}{2 - \sqrt{2}} \cdot B, \quad (4)$$

а при равномерном расположении зондов в линию, когда потенциальные зонды $m-n$ были расположены между токовыми зондами $a-b$:

$$G_2^{-} = 2 \cdot \pi \cdot B. \quad (5)$$

Зависимость масштабного коэффициента G_1 от соотношения W/B приведена в табл. 3.

Таблица 3. Значения масштабного коэффициента G_1

W/B	G_1 для вида схемы	
	линейной	четырёхугольной
0,1	13,86	11,83
0,2	6,99	5,92
0,5	2,78	2,38
1,0	1,5	1,34
2,0	1,09	1,06
5,0	1,005	1,004
10,0	1,000 7	1,000 5

В установке УЭС-2ЛЧ применялось количество жидкого металла, соответствующее условию $W/B > 10$, что объективно позволяло считать масштабный коэффициент $G_1 = 1$. Для линейной схемы расположения зондов рассчитан масштабный коэффициент $G_2^{-} = 0,022$ м, а для четырёхугольной – $G_2^{\square} = 0,049$ м.

В экспериментах контактное падение напряжения ΔU измерялось в диапазоне температур 30...180 °С в соответствии с ГОСТ 8024-90 (в котором указаны нормы нагрева частей электрических аппаратов) при постоянном токе $I = 5$ А. Для компенсации термоэлектродвижущей силы измерения проводились с изменением направления тока.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Полученный в экспериментах линейный характер температурной зависимости удельного электрического сопротивления $\rho = f(T)$ галлийсодержащих материалов для ЖМК можно описать уравнением

$$\rho_T = \rho_{30} \cdot (1 + \alpha \cdot T), \quad (6)$$

где ρ_{30} – значение удельного электрического сопротивления ЖМ при температуре 30 °С; α – температурный коэффициент электрического сопротивления; T – температура измерений, °С.

Значения коэффициентов ρ_{30} и α в уравнении (6) для галлия и его эвтектических сплавов, наиболее часто применяемых в ЖМК, приведены в табл. 4 (в скобках указано содержание элементов Ga, In, Sn, Zn в % по массе). Погрешность величины ρ_{30} определялась для доверительной вероятности 0,9 при 5-кратной повторности экспериментов на каждой из установок.

Таблица 4. Значения коэффициентов температурной зависимости удельного электрического сопротивления галлийсодержащих ЖМ-материалов

Материал	Ga	GI (77,5/22,5)	GIS (62/25/13)	GISZ (64/12/13/11)
$\rho_{30}, 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$	25,78±2,53	30,37±2,55	33,56±1,86	34,0±0,97
$\alpha, 10^{-5} \text{ град}^{-1}$	116	93	86	97

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Жидкометаллические электрические контакты, особенно композиционные, являются важным направлением развития сильноточной многоамперной энергетики, поскольку дают возможность получать низкое (в ряде случаев стремящееся к нулю) переходное электрическое сопротивление между жидкой и твердой фазами контактных деталей.

Экспериментально подтвержденный линейный характер температурной зависимости удельного электрического сопротивления галлийсодержащих материалов промежуточных ЖМ-сред дает возможность не только рассчитывать, но и прогнозировать эксплуатационные параметры и состояние ЖМК в электрических аппаратах.

Полученные в настоящей работе объективные данные об электрических (в последующих работах будут получены данные и о фрикционных) характеристиках ЖМ-материалов на основе галлия позволят создавать новые перспективные скользящие и коммутирующие контакты и конструкции электрических машин и электротехнического оборудования.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в тесном сотрудничестве с коллективом кафедры прикладной физики Тверского государственного технического университета. Отдельная благодарность выражается профессору, д.т.н. Измайлову Владимиру Васильевичу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Основы теории электрических аппаратов / под ред. П.А. Курбатова. СПб.: Лань. 2021. 592 с.
2. Дегтярь В.Г. Жидкометаллические контакты и контактные устройства в современных условиях. Сборник докладов Международной научно-технической конференции «Электрические контакты-2002». СПб. 2002. С. 166–172.
3. Беляев В.Л. Особенности работы и конструкции многоамперных электрических аппаратов. СПб.: СЗТУ. 2005. 274 с.
4. Яценко С.П., Пасечник Л.А., Скачков В.М., Рубинштейн Г.М. Галлий: технологии получения и применение жидких сплавов. М.: РАН. 2020. 344 с.

5. Дегтярь В.Г., Нестеров Г.Г. Контактные коммутирующие устройства электрических аппаратов низкого напряжения. М.: ВИНТИ АН СССР. 1980. Т. 2. 100 с.
6. Митюрёв А.А. Фрикционные и электрические характеристики жидкометаллических контактов при граничном трении. Дисс. ... канд. техн. наук. Тверь. 1992. 253 с.
7. Измайлов В.В., Новоселова М.В. Исследование электропроводности жидкометаллического композиционного порошкового материала // *Вестник Тверского государственного университета. Серия «Физика»*. 2010. Вып. 8. С. 97–106.
- 8 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.
9. 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.
10. Guo J., Chenga J., Tana H., Zhua Sh., Qiaoa Zh., Yanga J., Liua W. Short Communication Ga-based liquid metal: a novel current-carrying lubricant // *Tribology International*. 2019. V. 135. P. 457–462.
11. Xu A., Tian P., Li H., Wen Sh., Tian Y. Extreme pressure lubrication between ceramic and bearing steel with liquid metal // *Tribology International*. 2022. V. 174. Article 107797. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301679X2200370X> (дата обращения: 13.09.2022).
12. Яценко С.П. Галлий. Взаимодействие с металлами. М.: Наука. 1974. 220 с.

Для цитирования: 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.

STUDY OF CHARACTERISTICS OF GALLIUM-CONTAINING MATERIALS FOR SLIDING ELECTRICAL CONTACTS WITH INTERMEDIATE LIQUID METALLIC MEDIUM

A.A. MITYUREV, Cand. Sc.

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

A description is given of the designs of two installations for studying the electrical characteristics of liquid metals based on gallium and its eutectic alloys for liquid metal contacts (LMC) of electrical machines and apparatuses. The setups make it possible to determine the electrical resistivity of liquid metals, regardless of the design of liquid metal assemblies, without the formation of intermetallic compounds with gallium, in the temperature range according to GOST 8024-90 $T = 30...180$ °C. The linear nature of the temperature dependence of the electrical resistivity $\rho = f(T)$ of gallium-containing materials for LMC has been experimentally confirmed. For this temperature dependence, the values of the coefficient ρ_{30} of the specific electrical resistance of LM at a temperature 30 °C and the temperature coefficient α of the electrical resistance of gallium and its eutectic alloys are determined: GI (77,5 % Ga / 22,5 % In); GIS (62 % Ga / 25 % In / 13 % Sn); GISZ (64 % Ga / 12 % In / 13 % Sn / 11 % Zn) used in modern high-ampere electric devices, including composite LMCs.

Keywords: sliding electrical contact, liquid metal contact, boundary friction, wear, gallium, eutectic alloy, electrical resistivity, temperature dependence.

*Вестник Тверского государственного технического университета.
Серия «Технические науки». № 4 (16), 2022*