

**Алексей Викторович Макаров^{1,2,3*}, Евгений Викторович Харанжевский⁴,
Виталий Александрович Сирош¹, Алексей Геннадьевич Ипатов⁵, Наталья
Николаевна Соболева^{1,2,3}, Елена Георгиевна Волкова¹, Фаат
Залалутдинович Гильмутдинов⁶**

¹Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

²Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

³Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

⁴Удмуртский государственный университет, г. Ижевск, Россия

⁵Удмуртский государственный аграрный университет, г. Ижевск, Россия

⁶Удмуртский Федеральный исследовательский центр УрО РАН, г. Ижевск, Россия

*avm@imp.uran.ru

НОВЫЙ ЭФФЕКТ БЕЗЫЗНОСНОГО ТРЕНИЯ ПРИ ЛАЗЕРНОМ МОДИФИЦИРОВАНИИ СТАЛИ ВИСМУТОМ

Установлен новый эффект безызносного трения в условиях граничного трения скольжения при скоростях до 9 м/с и нагрузке до 250 Н алюминиевого сплава по стали, модифицированной висмутом короткоимпульсным лазерным оплавлением. Природа нового эффекта определяется подавлением адгезии между трущимися телами в результате модифицирования висмутом, образованием трибослоев субкарбоната висмута с легким базисным скольжением тетрагональной решетки, уменьшением механической составляющей трения алмазным выглаживанием поверхности, процессами самоорганизации поверхностей трения за счет выгодного перераспределения материала в зоне контакта и высокой циклической прочностью алюминиевого сплава.

Ключевые слова: модифицирование висмутом, безызносность, короткоимпульсная лазерная обработка, трение, алюминиевый сплав.

Aleksey V. Makarov, Evgeny V. Kharanzhevskiy, Vitaliy A. Sirosh, Aleksey G. Ipatov, Natalia N. Soboleva, Elena G. Volkova, Faat Z. Gil'mutdinov

A NEW EFFECT OF WEAR-FREE FRICTION IN LASER MODIFICATION OF STEEL WITH BISMUTH

A new effect of wear-free friction under boundary sliding friction conditions at speeds up to 9 m/s and loads up to 250 N of aluminum alloy on steel modified with bismuth by short-pulse laser melting has been established. The nature of the new effect is determined by the suppression of adhesion between the rubbing bodies as a result of modification with bismuth, the formation of bismuth subcarbonate tribolayers with easy basic sliding of the tetragonal lattice, a decrease in the mechanical component of friction by diamond surface smoothing, self-organization

processes of friction surfaces due to favorable redistribution of material in the contact zone and high cyclic strength of aluminum alloy.

Key words: bismuth modification, wearlessness, short-pulse laser processing, friction, aluminum alloy.

Актуальным является поиск новых научных и технологических подходов к модифицированию поверхности тяжело нагруженных и высокоскоростных узлов трения, эксплуатируемых в условиях граничной смазки, масляного голодания или сухого трения скольжения.

Целью исследования является описание условий безызносности модифицированных висмутом стальных поверхностей и их контртел за счет снижения молекулярной и механической составляющих трения без подачи смазки в процессе испытаний.

Задачами исследования являются определение состава, структуры и шероховатости стальной поверхности после модифицирования висмутом при короткоимпульсном лазерном оплавлении и алмазного выглаживания; трибологических свойств и зоны фрикционного контакта при граничном трении стального диска в парах с Al-сплавом, бронзой и чугуном.

Объектами исследования служили пары трения «модифицированная висмутом сталь 40 (0,40%С) - алюминиевый сплав АЖ-1, бронза БрАЖНМц 10-4-2, серый чугун СЧ-18».

Методы исследования включали трибологические испытания, сканирующая (СЭМ) и просвечивающая (ПЭМ) электронная микроскопия, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС), профилометрия.

В условиях граничного трения скольжения (при подаче смазки только перед началом испытания) у обоих элементов пары трения «модифицированный висмутом стальной диск – алюминиевый палец» во всем диапазоне скоростей (3-9 м/с) и нагрузок (25-250 Н) наблюдается практически нулевой износ (таблица) при стабильно низком температурном фоне работы сопряжения, не превышающем 55 °С [1]. У бронзы и серого чугуна отмечен больший износ с переходом к адгезионному схватыванию поверхностей, росту коэффициентов трения до 0,15-0,17 и температуры в зоне контакта до 220 °С при достижении пороговых значений нагрузки и скорости скольжения. Безызносному трению алюминиевого сплава способствует его более высокая, чем у бронзы и чугуна, усталостная прочность. При отсутствии схватывания все сплавы в испытаниях по модифицированному висмутом стальному диску характеризуются стабильно низкой величиной коэффициента трения в диапазоне от 0,03 до 0,08.

Таблица

Потери массы (мг) пальцев (измеренные после каждого испытания при различных нормальных нагрузках и скоростях трения), испытанных в паре со стальными дисками, модифицированными висмутом

Сплав	Скорость скольжения (м/с)	Нормальная нагрузка, Н									
		25	50	75	100	125	150	175	200	225	250
Алюминиевый сплав АЖ-1	3	0,10	0,02	0,00	0,09	0,00	0,15	0,00	0,05	0,00	0,11
	6	0,00	0,02	0,00	0,01	0,03	0,00	0,10	0,02	0,00	0,08
	9	0,01	0,02	0,02	0,03	0,00	0,06	0,08	0,00	0,06	0,09
Бронза БрАЖНМц 10-4-2	3	0,04	0,81	0,47	0,55	0,98	0,96	0,41	1,04	0,66	0,72
	6	0,00	0,72	0,38	0,33	0,66	3,53	1,19	1,63	1,23	1,14
	9	0,27	0,39	0,65	0,27	0,20	0,82	0,63	1,63	1,57	29,22*
Серый чугун СЧ-18	3	0,46	0,10	0,18	0,19	0,25	0,68	0,07	0,36	0,00	0,57
	6	0,18	0,15	0,13	0,12	0,38	2,39	0,28	12,28*	-	-
	9	0,10	0,22	0,24	0,11	37,03*	-	-	-	-	-

* Разрушение сопряжения по причине схватывания поверхностей трения

Переход к безызносному и сверхнизкому трению обусловлен тем, что в результате высокоскоростной кристаллизации при короткоимпульсном ($\tau=40$ нс) лазерном оплавлении слоя порошка оксидов на поверхности стали формируется аморфная металлическая матрица с наноразмерными включениями из восстановленного висмута (рис. 1), который вследствие несмешиваемости с Al, Cu и Fe препятствует адгезии с контртелом; по данным РФЭС на поверхности трения в результате реакции оксида висмута с углекислым газом из воздуха образуется трибопленка из субкарбоната висмута $(\text{BiO})_2\text{CO}_3$ [2], который легко сдвигается при трении; алмазное выглаживание поверхности за счет сглаживания микровыступов (рис. 2) снижает механическую составляющую трения. При безызносном трении процесс самоорганизации зоны контакта носит атермический характер (без фрикционного нагрева) и определяется пластическим течением контактирующих поверхностей без их взаимного разрушения [1].

Проведенное исследование открывает новый фундаментальный эффект безызносного трения [1], основанный не на избирательном переносе меди при наличии смазки (фундаментальное научное открытие «эффект безызносности при трении Гаркунова-Крагельского» – диплом № 41), а на устранении адгезии между материалами пары трения. Важнейшими факторами в новом эффекте безызносности являются: 1) уменьшение межмолекулярного взаимодействия (адгезии) между телами скольжения вследствие модифицирования стальной поверхности висмутом, который в равновесном состоянии не смешивается с алюминием, железом и медью даже в их расплавах; 2) образование на поверхности трения трибослоев субкарбоната висмута $(\text{BiO})_2\text{CO}_3$, имеющего тетрагональную решетку с легким базисным скольжением; 3) уменьшение механической составляющей коэффициента трения при помощи алмазного выглаживания; 4) самоорганизация поверхностей трения за счет выгодного перераспределения материала в зоне контакта; 5) высокая циклическая прочность алюминиевых сплавов.

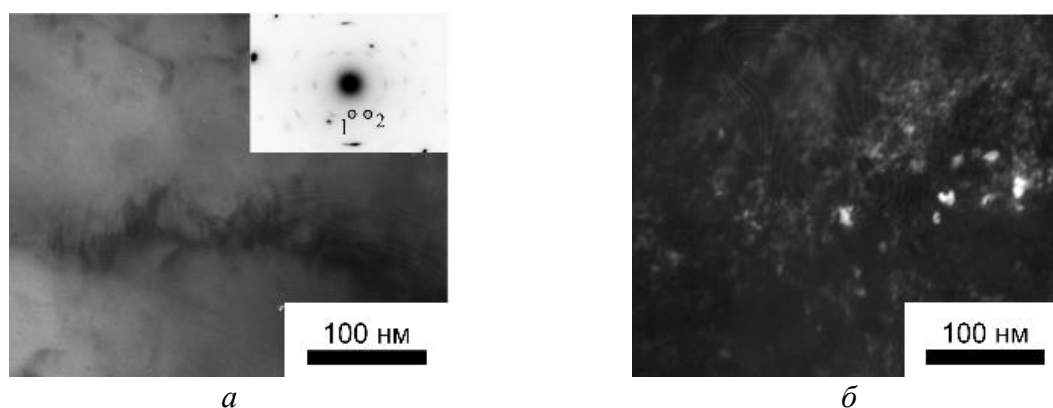


Рис. 1. Структура (ПЭМ) модифицированного висмутом стального диска:
 а – светлопольное изображение; б – темнопольное изображение в рефлексе 1 - Bi

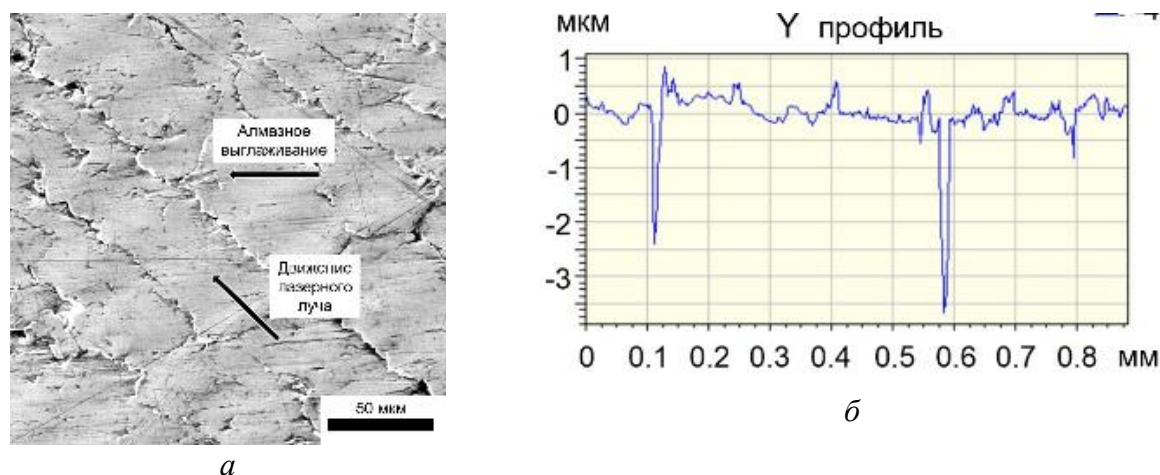


Рис. 2. Поверхность модифицированного висмутом стального диска после алмазного выглаживания: а – СЭМ-изображение; б – профиль поверхности

Обнаруженный эффект открывает новые возможности в обеспечении безызносности подшипниковых сопряжений за счет подавления молекулярной и механической составляющих трения контактирующих тел, работающих в условиях нарушения подачи смазки и при высоких кинематических и динамических нагрузках. Полученные данные имеют высокий научный и практический (Патент РФ 2826632 [3]) потенциал и могут быть реализованы в машиностроении, авиационной и автомобильной промышленности, энергетике и космической технике при проектировании подшипников и узлов трения [4].

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 19-79-20012.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Макаров А. В. Новый эффект безызносности при поверхностном легировании стали висмутом / А. В. Макаров [и др.] // Трение и износ. 2024. Т. 45. № 6 (в печати).
2. Makarov A. V. Ultralow wear in boundary lubrication: A tribological study of Bi-alloyed steel under high normal loads and sliding speeds / A. V. Makarov

- [et al.] // Friction. 2025. Vol. 13. 9441049.
<https://doi.org/10.26599/FRICT.2025.9441049>.
3. Способ получения износостойкого антифрикционного покрытия на подложке из стали, никелевого или титанового сплава: пат. 2826632 Рос. Федерация: МПК C23C 24/08; C23C 4/18; B23K 26/342; C23C 26/02 / Харанжевский Е. В., Ипатов А. Г., Макаров А. В.; заявитель ИФМ УрО РАН; патентообладатели ИФМ УрО РАН, ФГБОУ ВО «УдГУ». № 2023131926; заявл. 05.12.23; опубл. 16.09.24, Бюл. № 26. 14 с.
 4. Макаров А. В. Обеспечение технологического суверенитета России в металлургии и машиностроении / А. В. Макаров [и др.] // Вестник Российской академии наук. 2024. Т. 94. № 3. С. 232–245.
<https://doi.org/10.31857/S0869587324030068>.

REFERENCES

1. Makarov A. V. New effect of wearlessness in surface alloying of steel with bismuth / A. V. Makarov [et al.] // Journal of Friction and Wear. 2024. V. 45. № 6 (in print).
2. Makarov A. V. Ultralow wear in boundary lubrication: A tribological study of Bi-alloyed steel under high normal loads and sliding speeds / A. V. Makarov [et al.] // Friction. 2025. V. 13. 9441049.
<https://doi.org/10.26599/FRICT.2025.9441049>.
3. Method of producing wear-resistant antifriction coating on substrate made from steel, nickel or titanium alloy: pat. 2826632 Rus. Federation: CPC C23C 24/08; C23C 4/18; B23K 26/342; C23C 26/02 / Kharanzhevskiy E. V., Ipatov A. G., Makarov A. V.; applicant IMP UB RAS; proprietors IMP UB RAS, UdSU. № 2023131926; filed 05.12.23; published 16.09.24, Bull. № 26. 14 p.
4. Makarov A. V. Ensuring of technological sovereignty of russiain metallurgy and machine building / A. V. Makarov [et al.] // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2024. V. 94. № 3. P. 41–51.
<https://doi.org/0.31857/S08695873240306e2>.