

## Новый эффект безыносного трения

А.В. Макаров, Е.В. Харанжевский<sup>1</sup>, В.А. Сирош, А.Г. Ипатов<sup>2</sup>, Н.Н. Соболева<sup>3</sup>,  
Е.Г. Волкова, Ф.З. Гильмутдинов<sup>4</sup>

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

<sup>1</sup>Удмуртский государственный университет, г. Ижевск

<sup>2</sup>Удмуртский государственный аграрный университет, г. Ижевск

<sup>3</sup>Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова УрО РАН, г. Екатеринбург

<sup>4</sup>Удмуртский Федеральный исследовательский центр УрО РАН, г. Ижевск

Установлен новый эффект безыносного 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 основана не на избирательном массопереносе (эффект безыносности при трении Гаркунова-Крагельского), а 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 алюминиевых сплавов. Модифицированные висмутом поверхности демонстрируют сверхнизкий коэффициент трения скольжения (до 0,03) без подачи смазки в парах с контртелами из бронзы, алюминиевого сплава и чугуна. Данное явление открывает новую страницу в понимании эффекта безыносности и сверхнизкого коэффициента трения, а результаты исследований имеют высокий научный и практический потенциал.

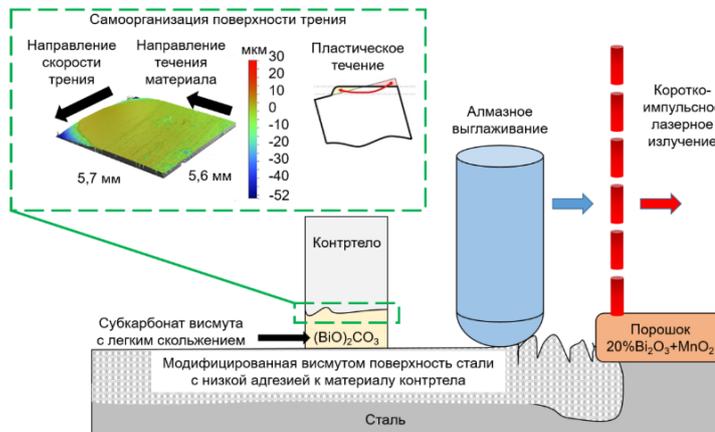


Рисунок 1 – Схема реализации нового эффекта безыносного трения и сверхнизкого коэффициента трения

### Публикации:

1. Макаров А.В., Харанжевский Е.В., Ипатов А.Г., Сирош В.А., Соболева Н.Н., Волкова Е.Г. Новый эффект безыносности при поверхностном легировании стали висмутом // Трение и износ. – 2024. – Т. 45. – Вып. 6 (в печати).
2. Макаров А.В., Иноземцев А.А., Дегтярь В.Г., Харанжевский Е.В., Котельников А.Б., Вопнерук А.А. Обеспечение технологического суверенитета России в металлургии и машиностроении // Вестник РАН. 2024. – Т. 94. – № 3. – С. 232–245.
3. Aleksey V. Makarov, Vitaliy A. Sirosh, Natalia N. Soboleva, Elena G. Volkova, Aleksey G. Ipatov, Faat Z. Gil`mutdinov and Evgeny V. Kharanzhevskiy. Ultralow Wear in Boundary Lubrication: A Tribological Study of Bi-Alloyed Steel under High Normal Loads and Sliding Speeds // Friction (Preprint).
4. Патент РФ 2826632 / МПК C23C 24/08; C23C 4/18; B23K 26/342; C23C 26/02. Способ получения износостойкого антифрикционного покрытия на подложке из стали,

никелевого или титанового сплава / Е.В. Харанжевский, А.Г. Ипатов, А.В. Макаров. – Опубликовано в БИМП 16.09.2024. – Бюл. № 26.

5. Kharanzhevskiy E.V., Ipatov A.G., Makarov A.V., Gil'mutdinov F.Z. Towards eliminating friction and wear in plain bearings operating without lubrication // Scientific Reports. – 2023. – V.13. – Art. 17362.

*Работа выполнена по проекту РНФ 19-79-20012 (ИФМ – объект научной инфраструктуры мирового уровня).*

*Актуальность* исследования: 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.

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

*Задачи* исследования: 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.

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

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

*Авторский вклад* сотрудников ИФМ: постановка задач, трибологические испытания, структурный анализ, анализ результатов исследования, написание статей, подготовка заявки на изобретение, формулирование принципов нового эффекта безызносности.

## **1. В трибологических испытаниях установлена реализация безызносного трения и сверхнизких коэффициентов трения.**

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 1) при стабильно низком температурном фоне работы сопряжения, не превышающем 55 °С. 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.

## **2. Обоснованы условия и причины проявления нового эффекта безызносности.**

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

(рисунок 2), 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  $(\text{BiO})_2\text{CO}_3$ , который легко сдвигается при трении; алмазное выглаживание поверхности за счет сглаживания микровыступов (рисунок 3) снижает механическую составляющую трения. При безыносном трении процесс самоорганизации зоны контакта носит атермический характер (без фрикционного нагрева) и определяется пластическим течением контактирующих поверхностей без их взаимного разрушения (рисунок 1).

Таблица 1 - 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

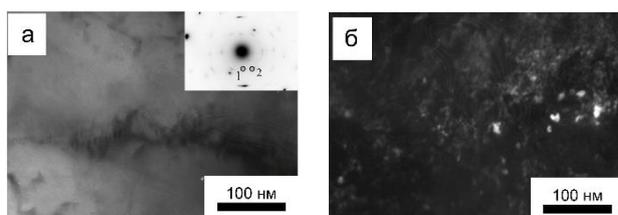


Рисунок 2 – Структура (ПЭМ) модифицированного висмутом стального диска: светлопольное (а) и темнопольное в рефлексе 1 - Bi (б) изображения

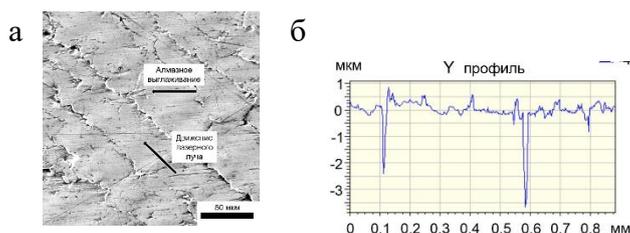


Рисунок 3 – СЭМ-изображение (а) и профиль (б) поверхности модифицированного висмутом стального диска после алмазного выглаживания

**Заключение:** Проведенное исследование открывает новый фундаментальный эффект безыносного трения, основанный не на избирательном переносе меди при наличии смазки (фундаментальное научное открытие «эффект безыносности при трении Гаркунова-Крагельского» – диплом № 41), а на устранении адгезии между материалами пары трения. Важнейшими факторами в новом эффекте безыносности 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.

Обнаруженный эффект открывает новые возможности в обеспечении безыносности 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) потенциал и могут быть реализованы в машиностроении, авиационной и автомобильной промышленности, энергетике и космической технике при проектировании подшипников и узлов трения.