

УДК 621.891/620.22

DOI: 10.52531/1682-1696-2025-25-3-43-52

Научная статья

EDN: GLQMNT

ВЛИЯНИЕ ПРИСАДОК МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОЧАСТИЦ (Cu, Zn, Ni, Cd) НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СМАЗКИ ЦИАТИМ-201

**Х. Нгуен¹, А.А. Кужаров²,
В.М. Нгуен¹**¹ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ, ХАНОЙ,
ВЬЕТНАМ² ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ,
РОСТОВ-НА-ДОНУ, РОССИЙСКАЯ
ФЕДЕРАЦИЯ

В данной статье представлены результаты исследования по применению металлических наночастиц (Cu, Zn, Ni, Cd) в качестве присадок к пластичной смазке ЦИАТИМ-201 (ГОСТ 6267-74) с целью повышения её триботехнических характеристик. Металлические наночастицы, синтезированные методом электролиза, преимущественно имеют размеры в нанометровом диапазоне.

Экспериментально установлено, что добавление наночастиц (Cu, Zn, Ni, Cd) в качестве присадок к смазке ЦИАТИМ-201 (ГОСТ 6267-74) существенно улучшает её противоизносные, противозадирные и антифрикционные свойства, максимальная эффективность наблюдается при использовании комбинации наночастиц всех четырёх металлов (Cu+Zn+Ni+Cd). Кроме того, в работе выявлено влияние природы, размера, формы и концентрации наночастиц на триботехнические свойства смазки ЦИАТИМ-201.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: наночастицы, ЦИАТИМ-201, триботехника, смазка, трение, износ, реметаллизант

Original article

THE INFLUENCE OF METALLIC NANOPARTICLE ADDITIVES (Cu, Zn, Ni, Cd) ON THE TRIBOTECHNICAL PROPERTIES OF SIATIM-201 GREASE

**H. NGUYEN¹, A.A. KUZHAROV²,
V.M. NGUYEN¹**¹ INSTITUTE OF TECHNOLOGY, HANOI,
VIETNAM² DON STATE TECHNICAL UNIVERSITY,
ROSTOV-ON-DON, RUSSIAN FEDERATION

his article presents the results of a study on the use of metallic nanoparticles (Cu, Zn, Ni, Cd) as additives to SIATIM-201 grease (GOST 6267-74) to enhance its tribotechnical properties. Metallic nanoparticles synthesized by the electrolysis method predominantly exhibit sizes within the nanometer range.

Experimental results show that the addition of nanoparticles (Cu, Zn, Ni, Cd) as additives to SIATIM-201 grease (GOST 6267-74) significantly improves its anti-wear, anti-seizure, and antifriction properties, the maximum efficiency is observed when using a combination of nanoparticles from all four metals (Cu+Zn+Ni+Cd). Furthermore, the study revealed the influence of the nature, size, shape, and concentration of nanoparticles on the tribotechnical properties of CIATIM-201 grease.

KEYWORDS: Nanoparticles, SIATIM-201, tribotechnics, grease, friction, wear, remetallizant

1. ВВЕДЕНИЕ

Трение и износ представляют собой серьезную проблему, требующую решения практически во всех областях промышленности, особенно в машиностроении. Ежегодно убытки от трения и износа машин составляют миллиарды долларов. Многочисленные научные исследования подтверждают, что одним из наиболее действенных способов решения данной

проблемы является использование смазочных материалов нового поколения, содержащих различные типы ультрадисперсных порошков (УДП). Частицы УДП, размеры которых обычно находятся в пределах от нанометров до микрометров, способны существенно снижать трение и износ в узлах трения, включая скользящие подшипники и опоры деталей машин [3, 5, 16, 19, 25]. Основная суть процесса снижения коэффициента трения и износа заключается в том, что в результате физико-химических реакций, непрерывно происходящих под воздействием давления и темпера-

туры в области трения, формируется относительно стойкое межметаллическое покрытие с очень низкой шероховатостью поверхности [13–15]. В результате процесс трения и износа осуществляется поочередно: старая поверхность постепенно изнашивается, одновременно с этим образуется новый слой устойчивой межметаллической структуры, заменяющий утраченный материал. Таким образом, коэффициент трения и скорость износа значительно снижаются.

Основным материалом для формирования межметаллического покрытия являются ультрадисперсные металлические частицы, содержащиеся в смазочных материалах. Процесс образования нового поверхностного слоя в англоязычной специальной терминологии называется «remetalization», а на русском – «реметаллизация». Сами металлоплакирующие присадки к смазочным материалам называют «реметаллизантами». Процесс реметаллизации также известен как «эффект Гаркунова», открытый российскими учеными Д.Н. Гаркуновым и И.В. Крагинским [4, 8]. Механизм этого процесса также может быть интерпретирован с помощью принципа самоорганизации (self-organization) согласно теории и алгоритмам кибернетики [20–22].

На современном рынке автохимии можно найти разнообразные виды реметаллизантов. Существует большое количество запросов на решения, гарантирующие безыносность и даже возможность проведения безразборного ремонта, таких как восстановление изношенных деталей машин, например, двигателей внутреннего сгорания, с применением таких «чудодейственных» составов. Тем не менее, на данный момент не разработаны присадки или добавки, которые могли бы обеспечить полное достижение эффекта безыносности в трансмиссионных, моторных или промышленных маслах.

Следует отметить, что благодаря развитию науки и техники, в том числе в машиностроении, исследование и внедрение методов нанотехнологий и их продуктов в области трибологии способствовали широкому применению наночастиц металлов, оксидов, солей, сплавов и их органических соединений в качестве присадок и добавок к смазочным материалам [17, 18, 24].

К сожалению, на сегодняшний день доказательства надежности и эффективности реметаллизантов в составах материалов, предназначенных для триботехнических применений, а также их влияния на долговечность и работоспособность узлов трения машин и качество продукции машиностроения остаются недостаточно изученными. Количество экспериментальных испытаний, проведенных для выявления факторов, влияющих на триботехнические свойства базовых смазок при добавлении к ним металлоплакирующих присадок, является недостаточным. Остается ряд вопросов, действительно связанных с эффективностью использования УДП в качестве присадок к

Х. НГУЕН, А.А. КУЖАРОВ, В.М. НГУЕН
ВЛИЯНИЕ ПРИСАДОК МЕТАЛЛИЧЕСКИХ
НАНОЧАСТИЦ (Cu, Zn, Ni, Cd)
НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
СМАЗКИ ЦИАТИМ-201

смазочным материалам, например, как зависит этот эффект от природы, размера, формы частиц и их количества. Кроме того, при разработке металлоплакирующих смазочных материалов необходимо учитывать типы используемой смазки и условия ее испытаний [7]. Таким образом, необходимо проведение дополнительных экспериментальных исследований с целью определения оптимальных параметров, обеспечивающих эффективное применение наномодифицированных металлоплакирующих смазочных материалов для снижения коэффициента трения и износа в узлах деталей машин.

В данной статье поставлена задача исследования влияния присадок нанодисперсных частиц различных металлов (Cu, Zn, Ni, Cd), полученных из отработанных электродов аккумуляторов, на триботехнические свойства пластичной смазки ЦИАТИМ-201. Особое внимание уделено изучению влияния природы, размера и концентрации наночастиц на эффективность смазки ЦИАТИМ-201 в снижении трения и износа трущихся поверхностей.

2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Объекты исследования. В ходе экспериментальных исследований использовались металлические частицы УДП Cu, Zn, Ni, Cd нанометровым размером, синтезированные в лаборатории методом электроосаждения в сочетании с ультразвуковой обработкой (УЗ-обработкой) с следующими параметрами: сила тока – 200 мА; плотность тока – 100 А·м⁻²; напряжение – 5 В; частота ультразвука – 22 кГц. Для преобразования переменного тока в постоянный использовался преобразователь ТЭК-14, а для ультразвуковой обработки – установка УЗД-22/44 с частотой генератора излучателя 22 кГц и выходной мощностью 2,5 Вт/см².

Схема технологии получения металлических ультрадисперсных частиц представлена на рисунке 1. Для этого электроды из различных отработанных металлов (Cu, Zn, Ni, Cd), выступающие в роли анодов, погружались в водный раствор аммиака $[\text{NH}_4]^+\text{OH}^-$. Электролиз приводил к растворению металлического анода (Cu, Zn, Ni, Cd) с образованием катионов, которые переносились к катоду и восстанавливались на его поверхности. Раствор аммиака одновременно выполняет функцию электролита и среды для стабилизации образующихся наночастиц металлов.

Под действием ультразвуковых волн происходило диспергирование слоя восстановленного металла, формировались кластеры из металлических наночастиц, которые затем удалялись с поверхности катода и стабилизировались в коллоидной форме в водном растворе аммиака. После этого нанокластеры в растворе подвергались центрифугированию и сушке до достижения постоянной массы. Таким образом получили УДП изучаемых металлов (Cu, Zn, Ni, Cd).

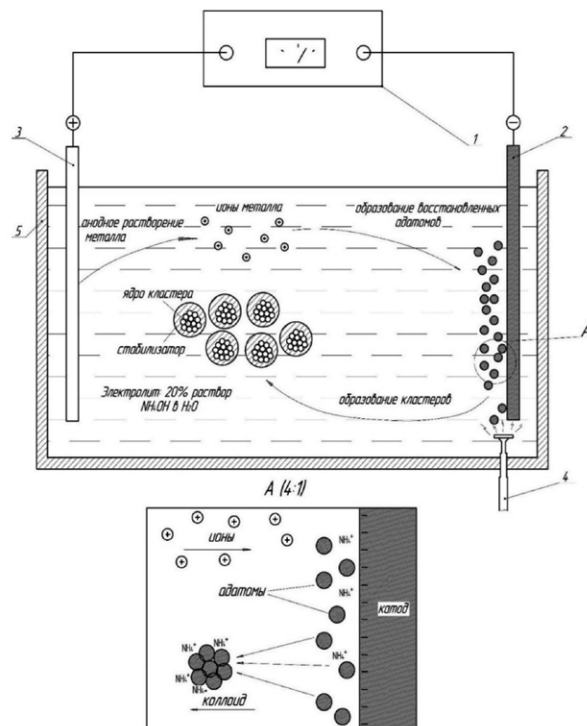


РИС. 1.

Схема технологии получения ультрадисперсных частиц металлов методом электроосаждения в сочетании с УЗ-обработкой: 1 – источник постоянного тока: ТЭК-14; 2 – катод: медь; 3 – анод (Cu, Zn, Ni, Cd); 4 – источник ультразвука УЗД-22/44; 5 – электролизер

В качестве основы исследуемых образцов металлоплакирующих смазочных композиций была использована пластичная смазка ЦИАТИМ-201 (ГОСТ 6267-74).

Полученные наночастицы металлов (Cu, Zn, Ni, Cd) были высушены и по отдельности вводились в смазку ЦИАТИМ-201 в различных концентрациях (по масс. %). Для достижения высокой степени однородности композиций введение наночастиц проводилось под воздействием ультразвука в течение 15–20 минут с последующим тщательным перетиранием. Однородность смазочных материалов оценивали методом визуального осмотра. Для этого испытуемый образец наносили тонким слоем (1–2 мм) на стеклянную пластину. При просмотре в проходящем свете невооруженным глазом в нанесенном слое не должно было наблюдаться наличие капель масла, сгустков загустителя или твердых включений.

2.2. Методики исследования. Размер и распределение полученных наночастиц металлов (Cu, Zn, Ni, Cd) по размерам определяли методом седиментационного анализа с использованием центрифуги Disk Centrifuge DC24000 (CPS, США) в соответствии со стандартом ISO 13318-1:2024. Этот прибор работает по принципу седиментационного фракционирования в центробежном поле и особенно эффективен для ана-

лиза наночастиц и микрочастиц в диапазоне от ~3 нм до 50 мкм. Метод основан на том, что частицы разного размера оседают с разной скоростью. Обработка данных и получение функции распределения частиц по размерам выполняется способом нелинейной регрессии. Форма и размеры наночастиц также исследовались с помощью сканирующего электронного микроскопа SEM EVO 40 HV (Carl Zeiss, Германия).

Экспериментальная оценка смазывающих свойств, а также эффективности снижения трения и износа металлоплакирующих композиций ЦИАТИМ-201 проводилась на четырехшариковой трибологической машине (Four Ball) с частотой вращения 1470 об/мин в соответствии с ГОСТ 9490-75 (шарики из стали ШХ-15 с радиусом 12,7 мм). Смазочные свойства материала ЦИАТИМ-201, модифицированного металлическими наночастицами Cu, Cd, Zn, Ni, оценивались по противоизносным и антифрикционным характеристикам:

- диаметр пятна износа (D_n), характеризующий противоизносные свойства смазочного материала (его способность препятствовать износу трущихся пар);
- нагрузка сваривания (P_s), определяющая предельную работоспособность смазки в условиях испытаний. Величина P_s представляет собой минимальную нагрузку, при которой наблюдаются заедание механизма и схватывание (сваривание) шаров;
- индекс задира (I_z), отражающий противозадирные свойства и предельную работоспособность смазки.

Исследование антифрикционных свойств смазочных композиций проводилось на приборе Tribotester T-11, где трение происходило между парами стали Р6М5 и 30ХГСА. Измерения проводились в соответствии со стандартом ASTM G 99-90 (аналогично DIN 50324).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 2 представлены кривые распределения по размерам частиц УДП (Cu, Zn, Ni, Cd), синтезированных методом электроосаждения в сочетании с УЗ-обработкой. Видно, что полученные образцы УДП металлов характеризуются достаточно широким распределением частиц по размерам. Однако следует отметить, что за исключением случая порошка никеля для всех остальных образцов большинство металлических частиц находится в нанометровом диапазоне (размер частиц в основном не превышает 100 нм). Для порошка металлического никеля характерна значительная доля частиц с размером более 200 нм. Возможно, это обусловлено агрегацией наночастиц с образованием более крупных структур.

Результаты электронно-микроскопического анализа (рис. 3) подтверждают данные о размере частиц

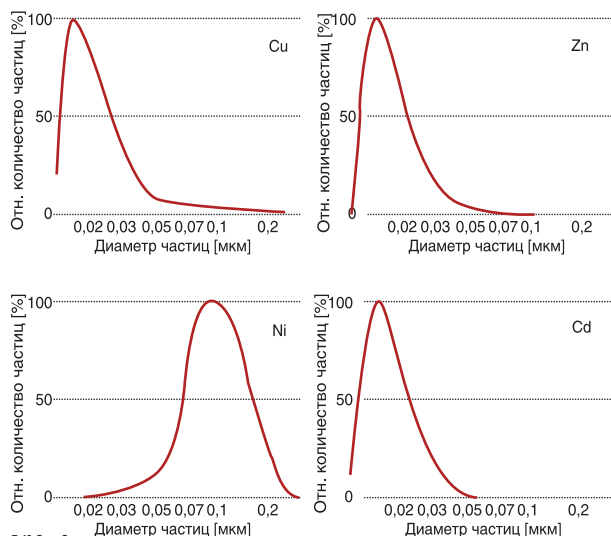


Рис. 2.

Распределение частиц синтезированных методом электроосаждения УДП (Cu, Zn, Ni, Cd) по размерам

полученных металлов. Установлено, что синтезированные металлические образцы порошков обладают высокой дисперсностью и характеризуются достаточно однородной морфологией. Большинство частиц металлических порошков Cu, Zn и Ni имеет округлую форму, причем обнаружено определенное количество игольчатых и дендритных частиц. Наночастицы Cd в основном обладает пластинчатой формой. Следует отметить, что для всех образцов характерна склонность металлических частиц к агрегации. Особенно в случае образца порошка никеля на SEM-фотографии отчетливо видны крупные сферические гранулы микронного размера. Тем не менее эти гранулы обладают наноструктурой, поскольку состоят из нанодисперсных металлических частиц никеля.

Представленные данные и анализ подтверждают, что все металлические частицы, полученные путем утилизации отработанных металлов, обладают нанометровыми размерами и относятся к наноматериалам. В целом размерный диапазон и морфологические характеристики полученных УДП металлов (Cu, Zn, Ni, Cd) обеспечивают возможность эффективного и рационального применения их в качестве присадок к смазочным композициям на основе смазки ЦИАТИМ-201.

На рисунке 4 представлены результаты экспериментов по исследованию противоизносных свойств образцов смазочных композиций с присадками металлических частиц различной природы на трибологическом тестере Four Ball. Критерием оценки является радиус пятна износа (D_n) на шариках трибосистемы после $t = 1$ ч при нагрузке $P = 196$ Н. Полученные результаты показывают, что добавление присадок металлических частиц Cu, Zn, Ni, Cd в смазку ЦИАТИМ-201 приводит к значительному уменьше-

Х. НГУЕН, А.А. КУЖАРОВ, В.М. НГУЕН
ВЛИЯНИЕ ПРИСАДОК МЕТАЛЛИЧЕСКИХ
НАНОЧАСТИЦ (Cu, Zn, Ni, Cd)
НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
СМАЗКИ ЦИАТИМ-201

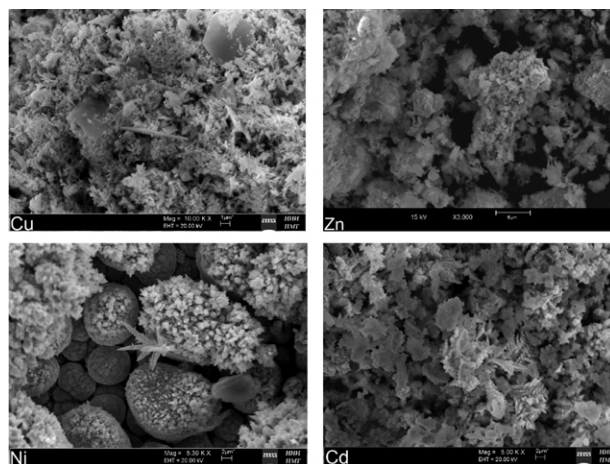


Рис. 3.

Результат электронно-микроскопического анализа образцов УДП металлов Cu, Zn, Ni, Cd

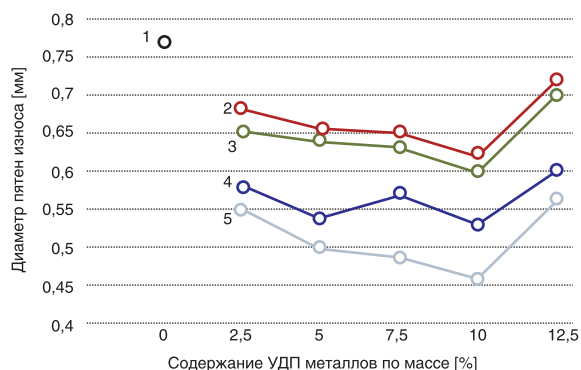


Рис. 4.

Результат по исследованию противоизносных свойств образцов смазочных композиций: 1 – ЦИАТИМ-201; 2 – ЦИАТИМ-201+Cu; 3 – ЦИАТИМ-201+Zn; 4 – ЦИАТИМ-201+Ni; 5 – ЦИАТИМ-201+Cd

нию величины радиуса пятна износа (D_n) по сравнению с базовым образцом (без присадок).

Таким образом, добавки УДП Cu, Zn, Ni, Cd позволяют эффективно улучшить противоизносные свойства пластичной смазки ЦИАТИМ-201. При этом эффективность снижения износа зависит от природы и концентрации металлических частиц присадок. Введение наночастиц кадмия обеспечивает максимальное снижение интенсивности изнашивания (примерно в 2 раза по сравнению с чистой смазкой).

При изучении зависимости величины D_n от содержания УДП металлов отмечено, что сначала с увеличением концентрации присадок металлов D_n уменьшается до минимального значения, после чего дальнейшее увеличение концентрации приводит к росту D_n .

Такая зависимость скорее всего связана с несколькими следующими физико-химическими аспектами:

– На начальных стадиях повышение концентрации наночастиц металлов способствует улучшению противоизносных свойств смазки, так как наночастицы могут заполнять микродефекты на поверхности трения, образуя тонкую защитную пленку, которая снижает контактное давление и уменьшает износ.

– При превышении определенного уровня концентрации наночастицы начинают агломерироваться (слипаться), образуя более крупные агрегаты. Это приводит к уменьшению количества свободных наночастиц, которые могли бы участвовать в защите поверхности. Кроме того агрегаты частиц могут стать источником абразивного износа, увеличивая трение и повреждение поверхностей, тем более, что избыточное количество частиц металлов увеличивает вязкость смазки и затрудняет ее циркуляцию, ухудшая распределение смазочного материала в зоне трения. Это может приводить к локальному перегреву и, как следствие, ухудшению противоизносных свойств.

Отмечено, что для всех исследуемых образцов смазочных композиций оптимальная концентрация добавок металлических наночастиц в смазке, при которой достигается максимальная эффективность снижения износа, составляет 10 масс. % независимо от природы металлов.

Полученные результаты в данной работе хорошо согласуются с литературными данными, т.е. присутствие высокодисперсных частиц металлов в смазочных основах оказывает значительное влияние на их триботехнические характеристики, причем эти характеристики существенно зависят от их природы и количества [9].

Эксперименты для определения величины нагрузки сваривания (P_c , характеризующей предельную работоспособность смазки, и индекса задира (I_z) были проведены при времени испытания $t=10$ с и варьировании нагрузки в интервале 300–2800 Н. Полученные

результаты показали, что для всех исследуемых образцов введение наночастиц металлов в концентрации 10 масс. % приводит к существенному увеличению величины P_c (рис. 5А) и I_z (рис. 5Б). Эффект снижения износа наиболее выражен в области больших нагрузок, именно в диапазоне от 1000 до 2500 Н. Таким образом, применение присадок наночастиц металлов позволяет повысить противоизносные и противозадирные свойства смазки ЦИАТИМ-201, а также ее предельную работоспособность.

Отмечено, что порядок увеличения величин P_c и I_z соответствует следующему ряду добавок наночастиц металлов: $Ni \rightarrow Cu \rightarrow Zn \rightarrow Cd \rightarrow (Cu+Zn+Ni+Cd)$. Максимальные значения P_c и I_z наблюдаются при добавлении частиц всех четырех металлов (2,5% Cu + 2,5% Zn + 2,5% Ni + 2,5% Cd) в сочетании, что почти в 2 раза превышает значения для образца ЦИАТИМ-201 без присадок.

В то же время, изучение антифрикционных свойств образцов смазочных композиций, проведенное на приборе Tribotester T-11, выявило снижение коэффициента трения (на поверхностях пары трения) при добавлении в смазку металлических наночастиц как в условиях малых ($V_1=0,1 \text{ м} \times \text{с}^{-1}$, рис. 6А), так и больших ($V_2=0,5 \text{ м} \times \text{с}^{-1}$, рис. 6Б) скоростей скольжения при нагрузке $P=0,8 \text{ МПа}$.

Установлено, при малой величине скорости скольжения $V_1=0,1 \text{ м} \times \text{с}^{-1}$ присутствие металлических частиц нанометровым диаметром позволяет значительно снизить коэффициент трения на поверхностях пары трения (кроме образца №2 – с добавлением частиц Ni) по сравнению с образцом основы (без присадок). В то время при большем значении скорости скольжения $V_2=0,5 \text{ м} \times \text{с}^{-1}$ эффективность в снижении коэффициента трения наблюдается для всех образцов смазочных композиций (в том числе и образца с добавлением никеля), причем этот эффект выражен сильнее

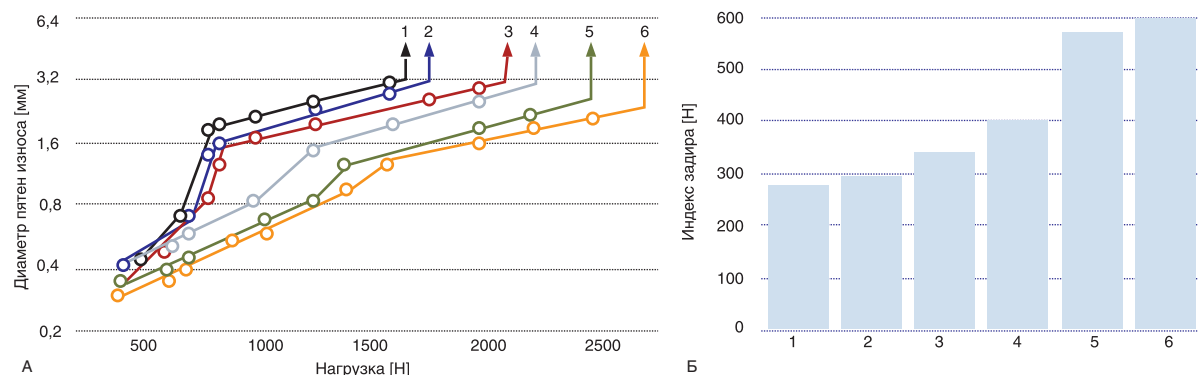


РИС. 5.

Результаты определения (А) величины нагрузки сваривания P_c и (Б) индекса задира I_z для образцов смазочных композиций: 1 – ЦИАТИМ-201; 2 – ЦИАТИМ-201+10% Ni; 3 – ЦИАТИМ-201+10% Cu; 4 – ЦИАТИМ-201+10% Zn; 5 – ЦИАТИМ-201+10% Cd; 6 – ЦИАТИМ-201+ 2,5% Cu + 2,5% Zn + 2,5% Ni + 2,5% Cd

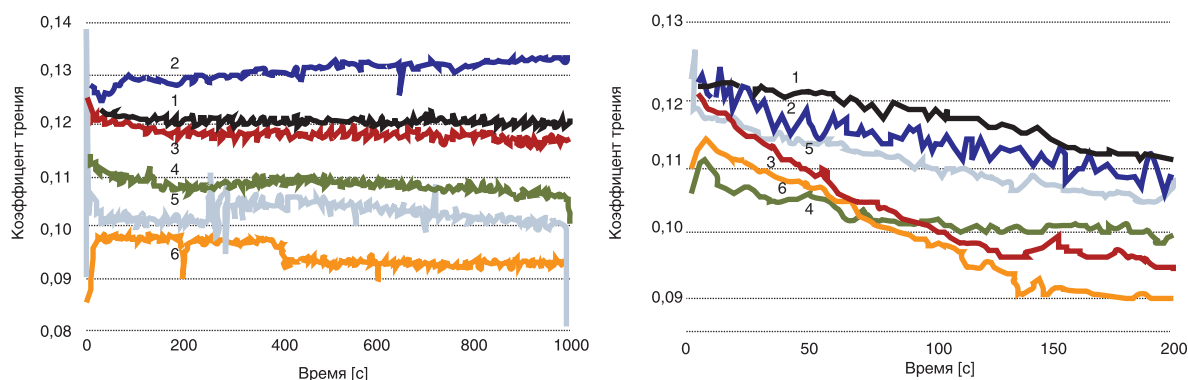


РИС. 6.

Зависимость коэффициента трения от времени при испытаниях со скоростями скольжения (А) $V_1=0,1 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ и (Б) $V_2=0,5 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$: 1 – ЦИАТИМ-201; 2 – ЦИАТИМ-201 + 10% Ni; 3 – ЦИАТИМ-201 + 10% Cu; 4 – ЦИАТИМ-201 + 10% Cd; 5 – ЦИАТИМ-201 + 10% Zn; 6 – ЦИАТИМ-201 + 2,5% Cu + 2,5% Zn + 2,5% Ni + 2,5% Cd

по сравнению со случаем малой скорости скольжения. В обоих случаях как при малой, так и большой скорости скольжения наибольшая эффективность достигается при применении комбинации четырех металлов (Cu+Zn+Ni+Cd).

Итоговые результаты триботехнических испытаний для образцов смазочных композиций, созданных на основе пластичной смазки ЦИАТИМ-201, приведены в таблице 1.

Высокая эффективность в снижении износа, задира и трения при введении металлических наночастиц Cu, Zn, Cd в качестве присадок к смазке ЦИАТИМ-201 в снижении износа и задира, вероятно, обусловлена особенностями природы, морфологией и размерными характеристиками частиц металлов.

Положительное влияние присадок металлических частиц, особенно в случаях добавления УПД Cu, Zn, Cd, было отмечено в ряде предыдущих работ. Использование микронных частиц порошков металлов,

таких как Sn, Cu, Pb, а также медных сплавов (латуни, бронзы) и других пластичных соединений, включая Zn-Sn, Cd-Sn и Bi-Pb-Sn-Cd, в качестве металлоплакирующих компонентов способствует улучшению и регулированию противоизносных, противозадириных и антифрикционных характеристик базовых смазочных материалов [10–12].

Показано, что добавление УПД Cd в смазку ЦИАТИМ-201 в основном приводит к более заметным положительным эффектам по сравнению с применением УПД металлов Cu, Zn, Ni. Одним из факторов, обуславливающих такие различия, может являться пластинчатая форма частиц порошка кадмия (рис. 3), которая отличает его от остальных порошков никеля, меди и цинка. Именно такая форма способствует формированию в начальной стадии приработки наноструктурированного слоя на поверхности стали, что способствует снижению коэффициента трения и повышению износостойкости элементов трибосо-

ТАБЛИЦА 1.

Результаты триботехнических испытаний для образцов смазочных композиций на основе смазки ЦИАТИМ-201

Образец	Испытание по ГОСТ 9490-75						Испытание на Т-11		
	D _н , мм					И _з , Н	Р _с , Н	Средний коэффицент трения	
								V, м×с ⁻¹	
								0,1	0,5
ЦИАТИМ-201	0,77					277	1646	0,120	0,118
	Содержание порошков по массе, %					Содержание порошков по массе: 10 %			
	2,5	5,0	7,5	10	12,5				
ЦИАТИМ-201 + Ni	0,58	0,54	0,57	0,53	0,60	294	1744	0,130	0,115
ЦИАТИМ-201 + Cd	0,55	0,50	0,49	0,46	0,56	590	2323	0,108	0,102
ЦИАТИМ-201 + Cu	0,68	0,66	0,65	0,62	0,72	337	2067	0,118	0,105
ЦИАТИМ-201 + Zn	0,65	0,64	0,63	0,60	0,70	403	2195	0,103	0,113
ЦИАТИМ-201 + (Cu+Zn +Ni+Cd)	0,45					600	2646	0,094	0,098

пряжения. Применение металлических частиц пластинчатой формы способствует самопроизвольному образованию стоп пластин на поверхностях трения, благодаря чему формируется и постоянно обновляется защитная металлическая пленка на протяжении всего процесса трения. В случае с кадмием такая пленка уже на начальном этапе эксплуатации приобретает многослойную наноструктуру, ориентированную перпендикулярно поверхности трения, что обеспечивает ее высокую эффективность в снижении износа, задира и трения.

С другой стороны, добавление частиц никеля в ЦИАТИМ-201 оказывается менее эффективным по сравнению с использованием частиц других металлов. Вероятнее всего, это связано с различием в их размерах. Известно, что размер частиц существенно влияет на их взаимодействие со смазкой, а также с трущимися поверхностями. Более того, размер частиц металлических добавок оказывает влияние на механические свойства смазочной основы (прочность, твердость, вязкость), а следовательно, и на ее триботехнические характеристики.

Зависимость интенсивности изнашивания от размера твердых частиц, введенных в смазку, может быть описана различными эмпирическими и теоретическими формулами, учитывающими условия трения, свойства частиц и характеристики контактирующих материалов [2, 23, 26]. Анализ этих формул позволяет предложить общий вид данной зависимости:

$$I = k \times d^n \times P^m \cdot v^l$$

где, I – интенсивность изнашивания; k – коэффициент, зависящий от свойств смазки, природы введенных твердых частиц и материалов поверхностей пар трения; d – средний диаметр твердых частиц в смазке; P – контактное давление; v – скорость скольжения; n, m, l – эмпирические или теоретические показатели, определяемые экспериментально.

Часто наблюдается нелинейная зависимость интенсивности изнашивания от размера частиц. При этом имеются 3 случая:

1) при слишком малых частицах ($d \rightarrow 0$) их воздействие незначительно;

2) при увеличении d до определенного значения ($d < d_0$) интенсивность изнашивания возрастает. Увеличение размера частиц приводит к их менее равномерному распределению в зоне фрикционного контакта, что снижает их эффективность во физико-химическом взаимодействии со смазочной средой и поверхностями трения. Это объясняется тем, что крупным частицам труднее проникать и заполнять макро-, микро- и нанонеровности, трещины и поры. В результате процесс формирования защитных металлических пленок на поверхностях трения затрудняется, что приводит к росту коэффициента трения и износа.

Кроме того, чрезмерно крупные частицы могут выступать в роли абразивных элементов, дополнительно увеличивая износ.

3) при дальнейшем росте ($d > d_0$) частицы уже во все не могут проникать в контактную зону трения, что снижает износ.

Экспериментально показано, что d_0 принимает значения порядка от десятков до несколько сотен микрон. В нашем исследовании выявлено, что размеры частиц находятся в нанометровом диапазоне, т.е. $d < d_0$, и, следовательно, с увеличением размеров частиц присадок интенсивность изнашивания контактных поверхностей возрастает.

Следует также отметить, что частицы никеля обладают формой, близкой к сферической, что затрудняет процесс формирования пограничного слоя на поверхности трения. В результате, по сравнению с частицами УДП Cu, Zn и Cd, влияние порошка никеля на триботехнические свойства смазочной основы оказывается менее значительным [9].

Экспериментальные данные подтверждают, что применение комбинации наночастиц всех 4 металлов (Ni+Cu+Zn+Cd) в качестве присадок к смазке ЦИАТИМ-201 более эффективно, чем использование индивидуальных металлов. Данный эффект также отмечен в ряде опубликованных работ, в которых показано, что использование сплавов металлов в качестве присадок к смазочным материалам приводит к значительному снижению коэффициента трения в узлах трения машин, компенсирует износ стальных деталей, а также улучшает микрогеометрию их рабочих поверхностей за счет заполнения углублений микронеровностей пластичными металлическими частицами. В работе Белого Д.М. и др. [1] установлено, что модифицирование смазки Литол-24 порошками сплава Bi-Pb-Sn снижает интенсивность линейного изнашивания пары трения в 8–10 раз. Результаты исследований [6, 27] показывают, что добавление наночастиц сплавов и соединений металлов в базовые масла способствует формированию тонкой пленки на поверхности трения, благодаря чему значительно уменьшаются интенсивность изнашивания, коэффициент трения, а также склонность поверхности деталей к усталостному разрушению.

Значительное повышение противоизносных, противозадирных и антифрикционных свойств, а также предельной нагрузочной способности смазки ЦИАТИМ-201 в данном случае, вероятно, обусловлено тем, что комбинация переходных металлов в ее составе при фрикционном взаимодействии способствует кластеро- и комплексообразованию между металлами и лигандами органического окружения смазочной среды. Это приводит к формированию на поверхности трения сложных по химическому и элементному составу металлической (сервоитной) и металлоорганической (серфинг) пленок переноса. Эти

пленки, как правило, обладают большей прочностью и стабильностью по сравнению с пленками индивидуальных металлов, что обеспечивает их повышенную эффективность в снижении износа и задира на более длительный срок.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом электроосаждения в сочетании с УЗ-обработкой были синтезированы УДП металлов Cu, Zn, Ni, Cd из отработанных электродов аккумуляторов, размеры которых находятся в нанометровом диапазоне. На основе триботехнических исследований смазочных композиций на базе смазки ЦИАТИМ-201 с добавками полученных металлических частиц сделаны следующие выводы:

1. Применение УДП металлов Cu, Zn, Ni, Cd и их комбинаций позволяет улучшить триботехнические свойства смазочной основы почти в 2 раза. Оптимальная концентрация добавок металлических частиц в смазку составляет 10 масс. %.

2. Эффективность снижения износа, задира и трения на поверхностях пар трения наиболее заметно проявляется при высоких нагрузках (1000–2500 Н) и повышенных скоростях скольжения.

3. На основе проведенного сравнительного анализа триботехнических исследований установлено, что форма и размер частиц УДП металлов оказывают значительное влияние на характеристики смазочных композиций. Показано, что наночастицы кадмия, обладающие пластинчатой морфологией и высокой дисперсностью, способствуют заметному улучшению триботехнических свойств смазки ЦИАТИМ-201. В то же время частицы никеля, имеющие округлую форму и склонность к образованию крупных микронных агрегатов, демонстрируют наименьшую эффективность.

4. Установлено, что введение в смазку ЦИАТИМ-201 комбинации УДП всех четырех металлов (Cu+Zn+Ni+Cd) является более эффективным по сравнению с использованием отдельных металлических присадок. Это связано с формированием на поверхности трения более сложных и устойчивых пленок переноса, обеспечивающих улучшенные триботехнические характеристики.

На основе полученных результатов представляется перспективной разработка смазочных материалов с улучшенными антифрикционными и противоизносными характеристиками, работающих в условиях трения и высоких нагрузок. Их применение может способствовать снижению затрат на ремонт и техническое обслуживание, увеличению эксплуатационного ресурса, а также повышению надежности и экономической эффективности работы технического оборудования и транспортных средств.

Х. НГУЕН, А.А. КУЖАРОВ, В.М. НГУЕН
ВЛИЯНИЕ ПРИСАДОК МЕТАЛЛИЧЕСКИХ
НАНОЧАСТИЦ (Cu, Zn, Ni, Cd)
НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
СМАЗКИ ЦИАТИМ-201

ЛИТЕРАТУРА

1. БЕЛЫЙ Д.М., Кусочкин В.Я., Мазур И.П. Триботехнические аспекты применения сверхпластичных сплавов // Влияние среды на взаимодействие твердых тел при трении: Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции. Днепропетровск, 1981. С. 41–42.
2. БЕРЕЗНЯКОВ А.И. Управление интенсивности изнашивания трибоузла при наличии частиц загрязнений в смазочном материале // Трение и износ. 1996. Т. 17. № 1. С. 48–49.
3. ГАРКУНОВ Д.Н. Триботехника. М.: Машиностроение, 1985. 424 с.
4. ГАРКУНОВ Д.Н. Научные открытия в триботехнике. Эффект безызносности. Водородное изнашивание металлов. М.: Изд-во МСХА, 2004. 384 с.
5. ГАРКУНОВ Д.Н. Некоторые закономерности износа металлов в условиях сухого и граничного трения и пути его уменьшения // Тр. III Всесоюз. конф. по трению и износу в машинах. 1960. Т. 2. С. 26–34.
6. ЗОЛОТУХИНА Л.В., ФРИШБЕРГ И.В. и др. Влияние ультрадисперсных порошков сплавов металлов на стальные поверхности при трении // Славянотрибо-5: Наземная и аэрокосмическая трибология-2000. СПб.: ВМПАВТО-РГТА, 2000. С. 239–241.
7. КАРПОВ А.С., Ключников В.И., Станчев Д.И. Влияние видов смазки и условий испытаний на износ различных материалов // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2008. № 6. С. 30–31.
8. КРАГЕЛЬСКИЙ И.В. Исследование явления избирательного переноса при трении // Вестн. РАН. 1975. № 1. С. 25–32.
9. КУЖАРОВ А.С., ОНИЩУК Н.Ю. Металлоплакирующие смазочные материалы // Долговечность трущихся деталей машин. 1988. № 3. С. 96–143.
10. КУСОЧКИН В.Я., Лившиц Б.А. Влияние типа смазки на рабочие характеристики закрытых подшипников качения // Трение и износ. 1984. Т. 5. № 5. С. 882–886.
11. ЛАПТЕВА В.Г., Каплина В.Ф. Исследование износостойкости пар трения сталь-сталь при использовании медь- и оловосодержащих присадок к смазочным маслам // Долговечность трущихся деталей машин. М.: Машиностроение, 1990. Т. 5. С. 58–65.
12. Пластичная смазка. А.с. № 518517. СССР С10М 5/12 // Бюллетень изобретений и открытий. 1976. № 23.
13. РАНСКИЙ А.П., Диденко Н.А. и др. Механизм избирательного переноса с точки зрения резонансного потенциала по Нечаеву // Наук. пр. ВНТУ. 2010. № 4. С. 1–4.
14. СИМАКОВ Ю.С., Михин Н.М. О физико-химических процессах при избирательном переносе // Физ.-хим. механика контактного взаимодействия и фреттинг-коррозия. Киев, 1973. С. 21–22.

15. ШЕПЕЛЬ А.Я. Механизм избирательного износа // Физ.-хим. Механика материалов. 1979. Т. 15. № 1. С. 73–74.
16. BIRLEANU C., PUSTAN M., CIOAZA M. ET AL. Effect of TiO₂ nanoparticles on the tribological properties of lubricating oil: an experimental investigation // Sci. Rep. 2022. Vol. 12. P. 5201.
17. CHEN S., LIU W., YU L. Preparation of DDP-coated PbS nanoparticles and investigation of the antiwear ability of the prepared nanoparticles as additive in liquid paraffin // Wear. 1998. Vol. 218. N 2. P. 153–158.
18. HERNANDEZ B.A. ET AL. CuO, ZrO₂ and ZnO nanoparticles as antiwear additive in oil lubricants // Wear. 2008. Vol. 265. N 3. P. 422–428.
19. ILIE F. Studies and researches concerning the tribological behaviour of friction couple functioning with selective transfer // Tribol. Int. 2006. Vol. 39. N 8. P. 774–780.
20. KUZHAROV A.S., MARCHAK R. ET AL. Tribological manifestations of self-organizations in system “brass-glycerol-steel” // Friction and Wear. 1996. Vol. 17. N 1. P. 113–122.
21. KUZHAROV A.S., BULGAREVICH S.B. ET AL. Molecular Mechanisms of Self-Organization in Friction. P. 6. The Analysis of Thermodynamic Features of Tribochemical Reactions // Friction and Wear. 2007. Vol. 28. No. 2. P. 212–216.
22. KUZHAROV A.S., BURLAKOVA V.E. ET AL. Triboelectrochemistry of effect “zero-wear” during friction. Mechanic of formation of boundary layer on steel in self-organization tribosystem “copper-glycerol-steel” // Friction and Wear. 1998. Vol. 19. N 6. P. 768–778.
23. LUDEMA K.C. Wear of Materials: Proceedings of the Ninth International Conference on Wear of Materials, San Francisco, CA, April 13-16, 1993. Elsevier Science Ltd., 1993.
24. PADGURSKAS J., RUKUIZA R., PROSYČEVAS I., KREIVAITIS R. Tribological properties of lubricant additives of Fe, Cu and Co nanoparticles // Tribol. Int. 2013. Vol. 60. N 4. P. 224–232.
25. SINGH A.P., DWIVEDI R.K., SUHANE A. Influence of nano particles on the performance parameters of lube oil – a review // Materials Research Express. 2021. Vol. 8. P. 102001.
26. STACHOWIAK G., BATCHELOR A.W. Engineering Tribology (4th ed.). Butterworth-Heinemann, 2013.
27. ZHANG Y.D., YAN J.SH., YU L.G., ZHANG P.Y. Effect of nano-Cu lubrication additive on the contact fatigue behavior of steel // Tribol. Lett. 2010. Vol. 37. N 2. P. 203–207.
- Scientific and Technical Conference. Dnepropetrovsk, 1981:41–42. (In Russian).
2. BEREZNYAKOV A.I. Control of the wear rate of a tribosystem in the presence of contaminant particles in the lubricant. *Trenie i iznos*. 1996;17(1):48–49. (In Russian).
3. GARKUNOV D.N. Tribotechnics. Moscow: Mashinostroenie, 1985:424. (In Russian).
4. GARKUNOV D.N. Scientific discoveries in tribotechnics. Wearlessness effect. Hydrogen wear of metals. Moscow: MSHA Publishing House, 2004:384. (In Russian).
5. GARKUNOV D.N. Some patterns of metal wear under dry and boundary friction and ways to reduce it. *Tr. III Vsesoyuz. konf. po treniyu i iznosu v mashinakh*. 1960;2:26–34. (In Russian).
6. ZOLOTUKHINA L.V., FRISHBERG I.V., KHARLAMOV V.V., KISHKOPAROV N.V., DUDKO P.P., KUZMIN V.N. Influence of ultrafine metal alloy powders on steel surfaces under friction. *Slavyanotribo-5: Nazemnaya i aerokosmicheskaya tribologiya-2000*. St. Petersburg: VMPAVTO-RGTA, 2000:239–241. (In Russian).
7. KARPOV A.S., KLYUCHNIKOV V.I., STANCHEV D.I. Influence of lubricant types and test conditions on the wear of various materials. *Trenie i smazka v mashinakh i mekhanizmkh*. 2008;(6):30–31. (In Russian).
8. KRAGELSKY I.V. Investigation of the phenomenon of selective transfer in friction. *Vestnik RAN*. 1975;(1):25–32. (In Russian).
9. KUZHAROV A.S., ONISHCHUK N.YU. Metal-plating lubricants. *Dolgoveschnost' trushchikhsya detalei mashin*. 1988;(3):96–143. (In Russian).
10. KUSOCHKIN V.YA., LIVSHITS B.A. Influence of lubricant type on the performance characteristics of sealed rolling bearings. *Trenie i iznos*. 1984;5(5):882–886. (In Russian).
11. LAPTEVA V.G., KAPLINA V.F. Investigation of wear resistance of steel-steel friction pairs using copper- and tin-containing additives in lubricating oils. *Dolgoveschnost' trushchikhsya detalei mashin*. 1990;5:58–65. (In Russian).
12. Plastichnaya smazka. A.S. No. 518517. USSR C10M 5/12. *Byulleten' izobreteniy i otkrytiy*. 1976;(23). (In Russian).
13. RANSKY A.P., DIDENKO N.A., TITOV T.S., BEZVOZYUK I.I. Mechanism of selective transfer from the perspective of Nechaev's resonance potential. *Nauk. pr. VNTU*. 2010;(4):1–4. (In Russian).
14. SIMAKOV YU.S., MIKHIN N.M. On physicochemical processes in selective transfer. *Fiz.-khim. mekhanika kontaktnogo vzaimodeystviya i fretng-korroziya*. Kyiv, 1973:21–22. (In Russian).
15. SHEPEL A.YA. Mechanism of selective wear. *Fiz.-khim. mekhanika materialov*. 1979;15(1):73–74. (In Russian).
16. BIRLEANU C., PUSTAN M., CIOAZA M. ET AL. Effect

REFERENCES

1. BELYI D.M., KUSOCHKIN V.YA., MAZUR I.P. Tribotechnical aspects of using superplastic alloys. The influence of the environment on the interaction of solid bodies during friction: Abstracts of the All-Union

- of TiO₂ nanoparticles on the tribological properties of lubricating oil: an experimental investigation. *Sci. Rep.* 2022;12:5201.
17. CHEN S., LIU W., YU L. Preparation of DDP-coated PbS nanoparticles and investigation of the antiwear ability of the prepared nanoparticles as additive in liquid paraffin. *Wear.* 1998;218;2:153–158.
 18. HERNANDEZ B.A. ET AL. CuO, ZrO₂ and ZnO nanoparticles as antiwear additive in oil lubricants. *Wear.* 2008;265;3:422–428.
 19. ILIE F. Studies and researches concerning the tribological behaviour of friction couple functioning with selective transfer. *Tribol. Int.* 2006;39;8:774–780.
 20. KUZHAROV A.S., MARCHAK R. ET AL. Tribological manifestations of self-organizations in system “brass-glycerol-steel”. *Friction and Wear.* 1996;17;(1):113–122.
 21. KUZHAROV A.S., BULGAREVICH S.B. ET AL. Molecular Mechanisms of Self-Organization in Friction. P. 6. The Analysis of Thermodynamic Features of Tribochemical Reactions. *Friction and Wear.* 2007;28;(2):212–216.
 22. KUZHAROV A.S., BURLAKOVA V.E. ET AL. Triboelectrochemistry of effect “zero-wear” during friction. Mechanism of formation of boundary layer on steel in self-organization tribosystem “copper-glycerol-steel”. *Friction and Wear.* 1998;19;(6):768–778.
 23. LUDEMA K.C. Wear of Materials: Proceedings of the Ninth International Conference on Wear of Materials, San Francisco, CA, April 13–16, 1993. Elsevier Science Ltd., 1993.
 24. PADGURSKAS J., RUKUIZA R., PROSYČEVAS I., KREIVAITIS R. Tribological properties of lubricant additives of Fe, Cu and Co nanoparticles. *Tribol. Int.* 2013;60;(4):224–232.
 25. SINGH A.P., DWIVEDI R.K., SUHANE A. Influence of nano particles on the performance parameters of lube oil – a review. *Materials Research Express.* 2021;8: 102001.
 26. STACHOWIAK G., BATCHELOR A.W. Engineering Tribology (4th ed.). Butterworth-Heinemann, 2013.
 27. ZHANG Y.D., YAN J.SH., YU L.G., ZHANG P.Y. Effect of nano-Cu lubrication additive on the contact fatigue behavior of steel // *Tribol. Lett.* 2010;37;(2):203–207.
-
- Нгуен Хиунь,**
 к.т.н., исследователь Технологического института
 1 Ван Хой, Ханой 100000, Вьетнам,
 1 Van Hoi, Hanoi 100000, Vietnam,
 тел.: +84981570986, e-mail: Nguyenhuynh1586@gmail.com
- Кужаров Андрей Александрович,**
 к.т.н., доцент Донского государственного технического университета
 344003, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1,
 344003, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1,
 тел.: +7 (863) 273-86-34, e-mail: aakuzharov@donstu.ru
- Нгуен Ван Минь,**
 к.т.н., исследователь Технологического института
 1 Ван Хой, Ханой 100000, Вьетнам,
 1 Van Hoi, Hanoi 100000, Vietnam,
 тел.: +84976248788, e-mail: Chinhnhan88@gmail.com