



# Обработка металлов

## (технология • оборудование • инструменты)

 Сайт журнала: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)


### Исследования износостойкости и антифрикционных свойств металлополимерных пар, работающих в имитаторе морской воды

Дена Батаев<sup>1, а, \*</sup>, Руслан Гойтемиров<sup>1, 2, б</sup>, Петимат Батаева<sup>1, с</sup>

<sup>1</sup> Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова Российской академии наук, Старопромысловское шоссе, 21а, г. Грозный, 364051, Чеченская Республика, Россия

<sup>2</sup> Чеченский государственный педагогический университет, ул. С. Кишиева, 33, г. Грозный, 364037, Чеченская Республика, Россия

<sup>а</sup> <https://orcid.org/0000-0003-4141-9353>, [denabataev61@mail.ru](mailto:denabataev61@mail.ru), <sup>б</sup> <https://orcid.org/0000-0003-0088-4603>, [groznymuh@mail.ru](mailto:groznymuh@mail.ru),

<sup>с</sup> <https://orcid.org/0000-0002-9628-0742>, [bataeva\\_ggntu@mail.ru](mailto:bataeva_ggntu@mail.ru)

#### ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 620.22 620.178.16

#### История статьи:

Поступила: 09 сентября 2022  
 Рецензирование: 06 октября 2022  
 Принята к печати: 25 октября 2022  
 Доступно онлайн: 15 декабря 2022

#### Ключевые слова:

Полимерный  
 Композиционный  
 «Маслянисты»  
 Износостойкий  
 Коэффициент трения  
 Имитатор морской воды  
 Усталостный износ

#### Благодарности:

Исследования частично выполнены на оборудовании ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов» (соглашение с Минобрнаукой № 13.ЦКП.21.0034).

#### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Морская вода – агрессивная среда, вызывающая коррозию, эрозию, а также кавитацию при движении с высокими скоростями стальных, чугунных, бронзовых или баббитовых деталей, работающих удовлетворительно только при наличии смазки. При этом нередко происходит выброс масляных пятен в воду, что приводит к загрязнению водного бассейна. **Методы исследования.** Для исследования изнашивания и коэффициента трения выбраны: чистый полиамид П-610 и антифрикционные материалы на его основе – *Маслянит Д* и *Маслянит 12*. В качестве материала контртела использовались металлы: нержавеющая сталь X18H9T, бронза БрАМЦ-9-2 и сплав титана BT-3. **Результаты и обсуждение.** Установлено, что материалы группы «маслянит» имеют значительно лучшие показатели по износостойкости и антифрикционным свойствам, чем чистый полиамид П-610. Показано, что причиной таких свойств *Маслянита Д* и *Маслянита 12* является наличие в их составах твердых и консистентных смазок, выполняющих одновременно еще и роль пластификатора. Мелкодисперсные металлические наполнители благоприятно влияют на отвод температуры из зоны трения и рост кристаллической фазы полимера. Выявлено положительное влияние железного сурика на трение *Маслянита 12*, обуславливающего генерирование на рабочих поверхностях пары трения защитной антифрикционной пленки. Обнаружено снижение износа и коэффициента трения по мере повышения класса чистоты металлической поверхности. Подтвержден преимущественно усталостный механизм износа полимерных материалов при трении в имитаторе морской воды. Приведенные результаты испытания *Маслянита 12* в реальной морской среде подтвердили его положительные характеристики.

**Для цитирования:** Батаев Д.К.-С., Гойтемиров Р.У., Батаева П.Д. Исследования износостойкости и антифрикционных свойств металлополимерных пар, работающих в имитаторе морской воды // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2022. – Т. 24, № 4. – С. 84–97. – DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.4-84-97.

### Введение

В изделиях современных строительных, судостроительных, судоремонтных и других отраслей (портовые и палубные механизмы, технологическое оборудование, плавсредства,

скоростные пассажирские суда на подводных крыльях, винтодейдвудные и рулевые устройства, судовые центробежные погружные насосы, оборудование платформ нефтедобычи, ферм по разведению морских рыб, опреснительных станций и др.), которые контактируют с пресной или морской водой, все чаще применяют полимерные материалы. Морская вода – сильный электролит, имеет высокую электропроводность и аэрацию. Высокая агрессивность данной среды, содержащей в своем составе сульфаты натрия, хлориды натрия, магния, кальция и другие соли,

#### \*Адрес для переписки

Батаев Дена Карим-Султанович, д.т.н., профессор, директор Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова Российской академии наук, Старопромысловское шоссе, 21а, 364051, г. Грозный, Чеченская Республика, Россия  
 Тел.: +7 (871) 222-26-28, e-mail: [denabataev61@mail.ru](mailto:denabataev61@mail.ru)

и окружающей атмосферы вызывают коррозию, эрозию, а также кавитацию от движения при высоких скоростях стальных, чугунных, бронзовых или баббитовых деталей и узлов, работающих удовлетворительно только при наличии смазки, которая при этом нередко попадает в воду и пагубно влияет на фауну и флору. В экстремальных условиях работают подшипники судовых валов (дейдвудные подшипники). Решение проблемы их надежности и работоспособности в среде воды, особенно при больших давлениях глубоководной морской среды, является одной из трудных задач материаловедения [1–3].

Полиамиды и композиции на их основе обладают высокой износостойкостью и стабильным коэффициентом трения на воздухе без смазки, в воде и в других средах, они позволяют свести к минимуму вибрационные нагрузки и шумы и обеспечивают экологическую безопасность водного бассейна. В то же время наличие жидкой среды, в том числе воды, приводит к набуханию полимерных материалов. Установлено, что при экспозиции в воде происходит стабилизация их размеров и улучшение триботехнических свойств [4, 5].

Вместе с тем в работах школы Ребиндера и других исследователей [6–9] широкое распространение получило представление об адсорбционном влиянии воды и других жидкостей на прочность твердых тел разной природы за счет понижения поверхностной энергии и «расклинивающего» воздействия жидкости на стенки трещины. В этих работах предполагается, что уменьшение прочности полимеров вызвано изменением поверхностной энергии, что приводит к уменьшению критического напряжения в вершине трещин. При таком подходе разрушение представляет собой критическое явление, которое наступает, когда напряжение в вершине наиболее опасной трещины достигает прочности материала. Подход, основанный на кинетической концепции прочности, был развит в работах Берштейна [10–12]. Он исходил из основного положения, в соответствии с которым разрушение происходит в результате накопления разрывов химических связей под действием тепловых флуктуаций, т. е. процессы зарождения и развития разрушения в присутствии молекул воды представляют собой реакцию механически стимулированного гидролиза.

В исследованиях по изучению триботехнических свойств полимерных композиционных материалов нами было установлено [13, 14], что в условиях сухого трения при осциллирующем движении рабочей поверхности, при одностороннем линейном перемещении, при наличии динамического нагружения, абразива или химически агрессивных сред ведущим механизмом при установившемся режиме трения износа является усталостное разрушение рабочего слоя. Состояние поверхностей трения пары характеризуется наличием определенного состава поверхностных пленок. В реальных условиях на воздухе все микровыступы и микротрещины почти мгновенно покрываются оксидными пленками и слоями адсорбированных молекул полимерного образца и наполнителей, которые прочно связываются с металлом. Обычно над ювенильной (чистой) поверхностью находятся слои оксидов. Эти пленки экранируют рабочие поверхности трибосистемы и способствуют граничному механизму трения при отсутствии смазки и «самоорганизации» процесса установившегося трения [15, 16].

Материалы, используемые для изготовления трущихся деталей, должны обладать низким коэффициентом трения и высокой износостойкостью, т. е. оптимальными основными информативными триботехническими характеристиками. Кроме того, при разработке композиционных материалов триботехнического назначения в качестве модификаторов используют материалы, способные при трении формировать на сопряженной поверхности пленки фрикционного переноса (графит, углерод, политетрафторэтилен, диоксид кремния, дисульфид молибдена и др.) и обеспечивать режим самосмазывания. Соответствовать этим требованиям можно путем использования полимерных композиционных материалов (ПКМ). Большинство полиамидов характеризуются хорошим сочетанием этих параметров, сохраняют свои свойства при воздействии на них агрессивных сред [3, 17–19].

Анализ исследований различных авторов показывает необходимость экспериментальной проверки поведения полимерных материалов при наличии в рабочем контакте морской воды.

Целью данной работы является исследование триботехнических свойств материалов на основе полиамида в среде имитатора морской

воды, проведение сравнительной оценки чистого и наполненных полиамидов с точки зрения их антифрикционных свойств и сопротивления усталостному изнашиванию при различных режимах испытаний.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие задачи:

- 1) на основе теоретических изысканий выбрать материалы, подлежащие испытаниям;
- 2) разработать методику испытаний и экспериментальное оборудование;
- 3) провести лабораторные испытания выбранных материалов;
- 4) верифицировать методы лабораторных испытаний в условиях, моделирующих реальные режимы эксплуатации изделия.

Для обеспечения высокой надежности узлов трения, работающих в морской воде, большое значение имеет правильный выбор пары трения. Повышенный износ, наблюдаемый при работе функциональных узлов, привел к необходимости создания ряда новых антифрикционных материалов на полимерной основе, одним из представителей которых является группа материалов под названием группы «маслянит». Благодаря своим уникальным характеристикам при работе в водных средах материалы «маслянит» получили широкое применение в гидротехнических сооружениях, портовых и судовых механизмах взамен подшипников качения, антифрикционных бронз, баббитов, капролона. На большинстве высоконапорных гидростанций России и стран СНГ используются материалы этого типа.

### Материалы и методики исследований

Для испытания выбраны: ненаполненный чистый полиамид П-610 и антифрикционные материалы на полимерной (полиамидной) основе – Маслянит Д и Маслянит 12. В качестве материала контртела использовались металлы: нержавеющая сталь 12Х18Н9Т, бронза БрАМц-9-2 и сплав титана ВТ-3.

Испытания проводились на торцевой машине трения (рис. 1). Верхняя головка 4 с испытуемым образцом 3 вставляется в шпиндель 8 машины трения. Узел трения представляет собой чашку 2 на самоустанавливающейся опоре 11, в которую помещается фиксируемое штифтом от проворачивания металлическое контртело 9.

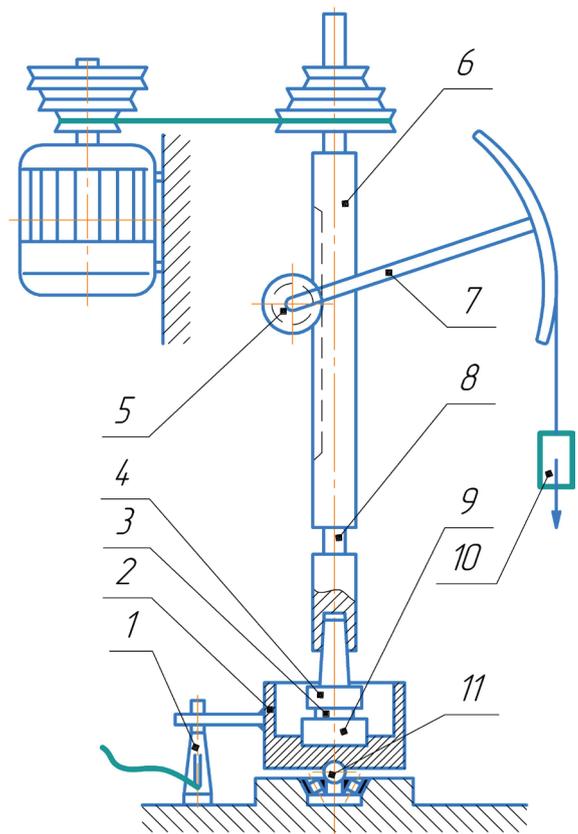


Рис. 1. Торцевая машина трения

Fig. 1. End friction machine

Сила трения определялась при помощи тензобалочки 1. Нагружение производилось рычажной системой 5, 6, 7 и грузом 10.

В чашку на 25...30 мм выше плоскости трения заливается имитатор морской воды, приготовленный в следующем процентном соотношении (к рабочей среде) основных компонентов: (NaCl – 2,42 %; CaCl<sub>2</sub> – 0,12 %; NaSO<sub>4</sub> – 0,4 %; Mg Cl<sub>2</sub> – 1,1 %) 6Н<sub>2</sub>O. Узел охлаждался от перегрева воздушным потоком при помощи вентилятора.

Образцы испытуемого материала представляют собой втулки кольцевого сечения с прорезями в виде секторов для обеспечения непрерывного доступа рабочей среды (имитатора морской воды) в зону трения. Коэффициент перекрытия  $K = 1/3$  (отношение площади контакта к полной поверхности кольцевого сечения). Форма и размеры образца показаны на рис. 2. Образцы изготавливались методом литья под давлением с последующей термо- и механической обработкой. Чистота поверхностей трения всех испытуемых образцов и контртел соответствовала 7-му классу ( $Ra = 0,8$  мкм).

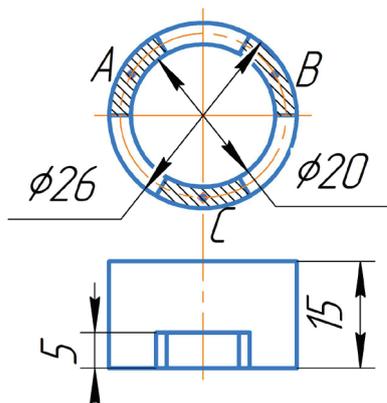


Рис. 2. Форма и размеры образца

Fig. 2. Sample shape and dimensions

**Методика испытаний.** Перед началом эксперимента образцы выдерживались в течение 24 часов в имитаторе морской воды для исключения влияния на показания замеров фактора набухания полимерной матрицы в жидкой среде, затем обезжиривались бензином и ацетоном. Для всех вариантов пар трения сравнительные испытания проводились при следующих режимах:

- удельной нагрузке  $P_{уд} = 4,5$  МПа;
- линейной скорости по среднему радиусу образца  $V = 0,14$  м/с.

Длительность одного эксперимента составляла 11 часов. Текущие замеры производились через каждый час во время приработки образцов с целью определения точки перехода режима приработки в режим стационарного (установившегося) износа и через 6 часов – после стабилизации процесса. Перед замером образцы обезжи-

ривались. Линейный износ материала замерялся по результатам трех опытов на вертикальном оптиметре с точностью 0,001 мм на трех площадках трения (A, B, C) отдельно и усреднялся. Все опыты проводились трижды, результаты усреднялись.

## Результаты и обсуждение

Полученные результаты износа во времени представлены в табл. 1 и по усредненным значениям трех испытаний (опытов) выполнено их графическое изображение в виде гистограмм (рис. 3).

Из табл. 1 и гистограмм (рис. 3) видно, что материалы группы «маслянит» с наполнителями имеют значительно лучшие показатели по износостойкости, чем чистый полиамид П-610. Надо полагать, что причиной высокой износостойкости Маслянита Д и Маслянита 12, имеющих одну и ту же полиамидную основу (матрицу), является наличие в их составах как твердых, так и консистентных смазок, выполняющих одновременно и роль пластификатора. Наполнителями этих композиций также являются мелкодисперсные металлические порошки, повышающие теплопроводность материала и снижающие локальные температуры в зоне трения [18]. Кроме того, частицы указанных порошков, являясь центрами кристаллообразования, повышают кристаллическую фазу материала, положительно влияющую на его износостойкость [18, 19].

Сравнивая «масляниты» между собой, следует отметить, что у Маслянита Д скорость

Таблица 1

Table 1

**Результаты исследования износостойкости металлополимерных пар трения в имитаторе морской воды (скорость изнашивания, мкм/ч)**

**The results of wear resistance of metal-polymer friction pair in the sea water simulator (wear rate,  $\mu\text{m/h}$ )**

| Материал образца | Эксперимент | Сталь 12X18H9T | Бронза БрАМц-9-2 | Сплав титана ВТ-3 |
|------------------|-------------|----------------|------------------|-------------------|
| Полиамид П-610   | Опыт 1      | 25             | 11,6             | 90,3              |
|                  | Опыт 2      | 69             | 35,6             | 210               |
|                  | Опыт 3      | 21,4           | 5,9              | 223               |
| Маслянит Д       | Опыт 1      | 5,2            | 9,6              | 26,5              |
|                  | Опыт 2      | 5,2            | 1,5              | 10,2              |
|                  | Опыт 3      | 0,5            | 3,1              | 8,8               |
| Маслянит 12      | Опыт 1      | 0              | 0,72             | 8,0               |
|                  | Опыт 2      | 3,3            | 17,2             | 42,4              |
|                  | Опыт 3      | 174            | 0,055            | 3,7               |

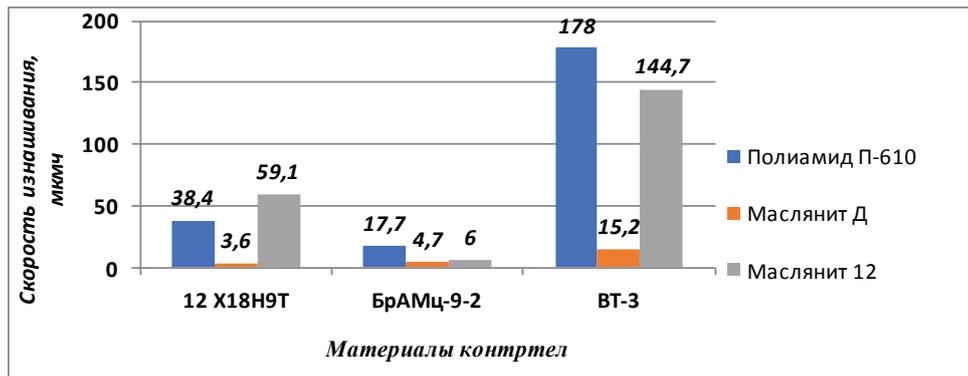


Рис. 3. Скорости изнашивания металлополимерных пар в имитаторе морской воды, мкм/ч

Fig. 3. Wear rates of metal-polymer friction pairs in a sea water simulator,  $\mu\text{m/h}$

изнашивания после приработки поверхностей стабилизируется, в то время как у Маслянита 12 даже по истечении принятого экспериментального времени (11 часов) наблюдается достаточно большой разброс этого параметра оценки: нулевой износ при работе в паре со сталью в одном из опытов и высокий (174 мкм/ч) – в другом. Объяснить эту «ложную безызносность» можно наличием в его составе железного сурика. Как известно, железный сурик – окись железа  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – используется для создания антикоррозионного и влагонепроницаемого покрытия конструкций. В случае трения в соленой воде на трущейся рабочей поверхности генерируется тонкая антизадириная пленка.

Следует полагать, что в процессе формирования пленки фрикционного переноса в поверхностном слое полимерного тела происходят сложные физико-химические изменения, свя-

занные с развитием конкурирующих процессов деструкции и структурирования. С позиций термодинамики и структурно-энергетической самоорганизации начальный этап трения (приработка) характеризуется интенсивным разрушением исходных структур и формированием новых, так называемых трибоструктур, обладающих более высокими антифрикционными свойствами. При этом происходит своего рода самоорганизация трибосистемы [18–22].

Все три испытываемых материала (рис. 3) имеют значительно худшие результаты при трении с титаном, чем при трении со сталью и бронзой, что характерно для титановых сплавов [21, 23]. Антифрикционные свойства у «маслянитов» при трении со всеми металлическими контртелами значительно выше, чем у полиамида П-610 (рис. 4–6), причем у последнего в пределах всего ресурса экспериментального времени (11 часов)

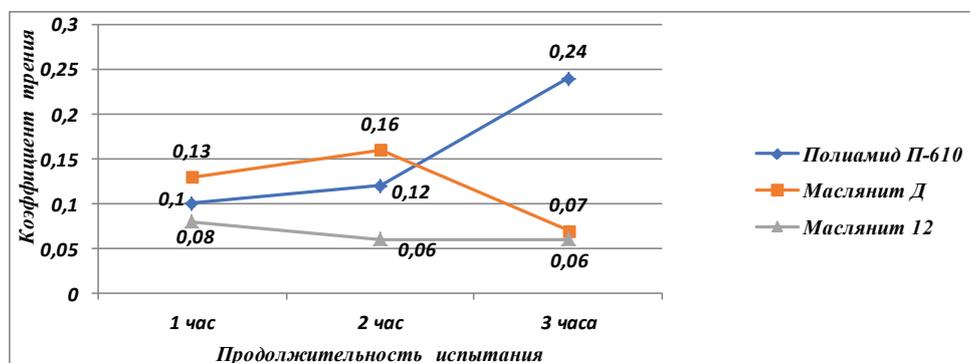


Рис. 4. Динамика значений коэффициентов трения пары: нержавеющая сталь 12X18H9T – полимерный материал в период завершения процесса приработки

Fig. 4. Dynamics of friction coefficients values of a pair: stainless steel 12Cr18Ni9Ti and polymeric material during the completion of the running-in process

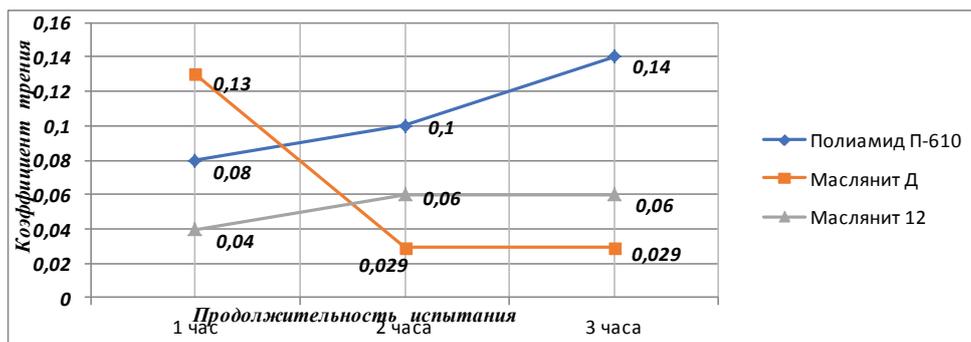


Рис. 5. Динамика значений коэффициентов трения пары: бронза БрАМц-9-2 – полимерный материал в период завершения процесса приработки

Fig. 5. Dynamics of friction coefficients values of a pair: bronze (9 % Al; 2 % Mn) and polymeric material during the completion of the running-in process

при испытании в паре со сталью и бронзой вместо стабилизации коэффициента трения наблюдалось его постоянное увеличение (рис. 4, 5).

Наличие грубого «пика» коэффициента трения полиамида П-610 (рис. 6) при работе в паре с титановым контртелом, повышающегося до значения 0,7, вполне коррелируется с результатами испытаний этих материалов на износ (см. рис. 3), показывающими предельное значение скорости изнашивания (178 мкм/ч) за все проведенные в данной работе эксперименты. Резкое снижение коэффициента трения этого материала можно объяснить деструктивными процессами полимера, происходящими в зоне трения при его катастрофическом износе.

Характер процесса приработки металлополимерной пары трения, во многом определяющего дальнейший ресурс рабочего узла механизма,

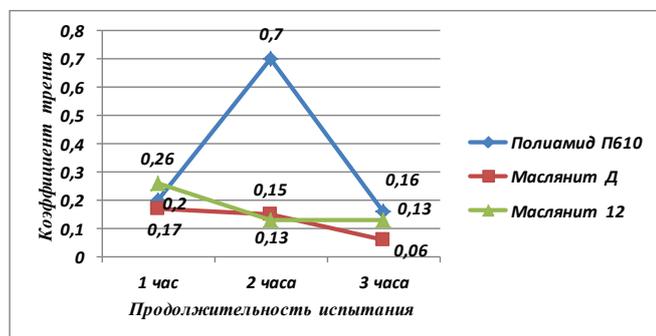


Рис. 6. Динамика значений коэффициентов трения пары: сплав титана VT-3 – полимерный материал в период завершения процесса приработки

Fig. 6. Dynamics of friction coefficients values of a pair: titanium alloy VT-3 and polymeric material during the completion of the running-in process

в свою очередь, зависит от класса чистоты наиболее твердой поверхности – металлической [24, 25]. Для исследования влияния указанного фактора (шероховатости) на триботехнические свойства металлополимерной пары были выбраны бронза БрАМц-9-2 и Маслянит 12, вышеуказанные «безызносные» свойства которого представляли определенный интерес для дальнейшего исследования. Бронзовые контртела изготавливались с пятью классами чистоты поверхности. Каждое испытание проводилось по вышеуказанной методике в течение одного часа. Результаты испытаний представлены в табл. 2 и изображены графически (рис. 7–9).

Вода, в том числе и морская, отрицательно сказывающаяся на трение металлических пар трения, благоприятно влияет на процесс трения маслянитов, что объясняется возникающим при ее наличии в зоне контакта, помимо вышеуказанной разделительной оксидной пленки, еще и гидродинамическим эффектом.

Следует отметить, что в узлах с частыми остановками или с возможностью попадания в них абразива трение происходит с перманентными микроприработками, связанными с переходом гидродинамического трения в граничное, износ при котором в 3–4 раза выше жидкостного трения [23].

Графики влияния чистоты поверхности контртела на среднечасовой износ и износ на километр пройденного пути скольжения (рис. 7 и 8) идентичны и имеют тенденцию к снижению износа по мере снижения шероховатости металлической поверхности.

**Результаты исследования влияния шероховатости металлической поверхности на работу металлополимерной пары трения в имитаторе морской воды**

**Results of the effect of metal surface roughness on a metal-polymer friction pair operation in a sea water simulator**

| Номер п/п | Параметр шероховатости контртела, $Ra$ , мкм | Средний часовой износ Маслянита 12, мкм/ч | Средний износ Маслянита 12 на 1 км пути, мкм/км | Коэффициент трения |
|-----------|--|---|---|--------------------|
| 1         | 3,2  | 30,6                                      | 9,05  | 0,0450             |
| 2         | 1,6  | 22,0                                      | 6,5   | 0,0391             |
| 3         | 0,8  | 20,3                                      | 6,0   | 0,0309             |
| 4         | 0,4  | 10,0                                      | 2,96  | 0,0236             |
| 5         | 0,2  | 8,6                                       | 2,62  | 0,0200             |

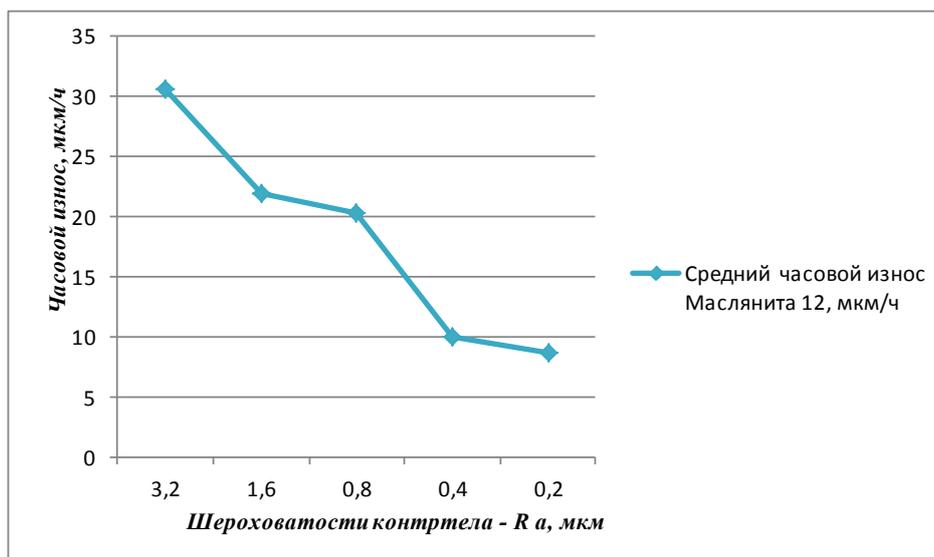


Рис. 7. Влияние шероховатости контртела на средний часовой износ Маслянита 12

Fig. 7. Influence of the counterbody roughness on the average hourly wear of Maslyanite 12

Следовало бы ожидать, что поскольку поверхность с большей шероховатостью подобно лопастям лучше захватывает и затягивает смазочную среду (в нашем случае – имитатора морской воды) в зазор контакта, то такая грубая поверхность должна благоприятствовать созданию в контакте избыточного давления и гидроклина, обеспечивающего «всплывание» вала.

Однако на реализацию эффекта гидродинамического трения влияет много факторов: удельное давление, скорость скольжения, вяз-

кость среды и другие, оптимум которых трудно обеспечить не только в реальной практике, но и на стадии изучения, что подтверждается данными исследованиями. В результате преобладает повышенный износ полимерной композиции в период приработки и микроприработки из-за режущего действия микровыступов бронзовой поверхности. В поверхностных деформируемых слоях композита и на рабочей поверхности контртела сохраняются сформированными в начальном периоде трения в результате трибодес-

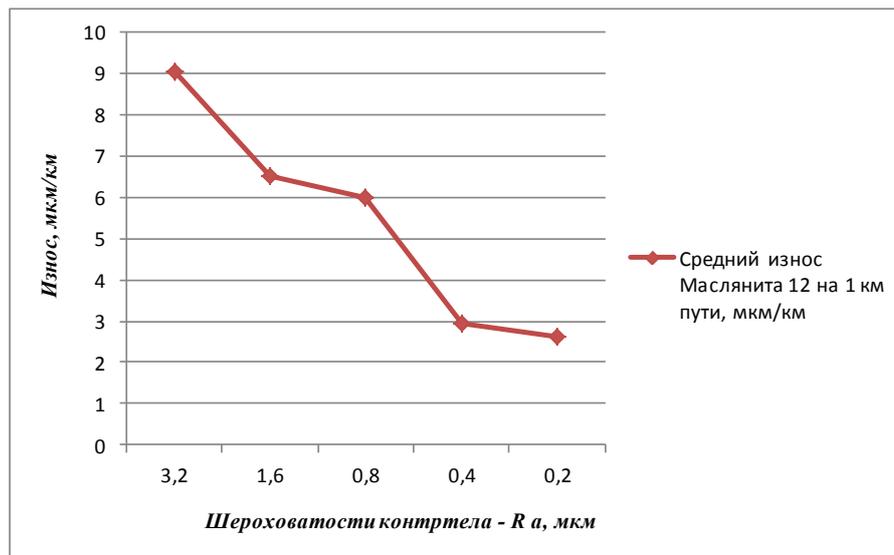


Рис. 8. Влияние шероховатости контртела на износ Маслянита 12 на 1 км пути трения

Fig. 8. Influence of the counterbody roughness on the wear of Maslyanite 12 per 1 km of the friction path

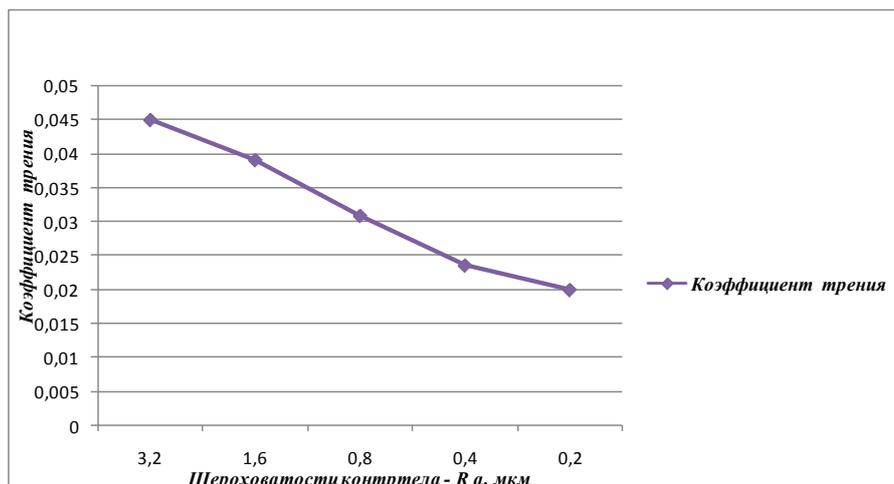


Рис. 9. Влияние шероховатости контртела на коэффициент трения Маслянита 12

Fig. 9. Influence of the counterbody roughness on the coefficient of friction of Maslyanite 12

струкции пленки из макромолекул полиамида, разложений бронзы и железного сурика. Положительная тенденция снижения износа и трения с повышением чистоты поверхностей можно объяснить более мягким сглаживанием мало выступающих неровностей контртела, более быстрой приработкой, притиркой рабочих поверхностей и, следовательно, ранним наступлением процесса установившегося износа и «самоорганизация» трибосистемы.

### Стендовые испытания в морской воде

Испытания проводились вблизи г. Сочи (Лазаревское).

В связи с тем, что при трении может происходить значительный разогрев материала, обусловленный малой теплопроводностью пластмасс и теплоотводом из зоны трения преимущественно только через металлическое контртело, а также с учетом того, что узлы реальных морских судов и глубоководного оборудования помимо нагрузки

от передаваемого рабочего усилия испытывают еще и давление воды, требовалось провести испытания, максимально приближенные к реальным – эксплуатационным. Для проведения этих исследований был создан стенд глубоководных натуральных испытаний, представляющий собой камеру, в которую при помощи насоса высокого давления (до 200 атм) подавалась морская вода. В качестве материалов пары трения для сопоставления лабораторных и стендовых результатов были выбраны бронза БрАМц-9-2 и Маслянит 12. Испытываемые образцы имели форму полувкладышей размером  $\varnothing 80 \times 50 \times 26$  с внутренними проточками для обеспечения непрерывного доступа в зону трения смазывающей среды – морской воды (рис. 10). Для снятия внутренних напряжений изготовленные методом литья под давлением образцы подвергались термообработке в масле марки «Вапор». Перед испытанием образцы в течение 24 часов выдерживались в морской воде. Испытания проводились при удельной нагрузке 2,5 МПа и скорости скольжения 0,3 м/с. Замеры осуществлялись через каждые 3 часа во время приработки и через 50 часов при установившемся износе. Общая продолжительность испытания составляла 670 часов. Места замеров метились по шаблону.



Рис. 10. Образцы из Маслянита 12, прошедшие стендовые испытания в морской воде

Fig. 10. Samples of Maslyanit 12 after bench tests in sea water

Период приработки пар трения длился 72 часа, после которого скорость изнашивания установилась на уровне 0,5...0,8 мкм/ч. В результате визуального осмотра и проведенных в конце испытаний замеров образцов (средний износ менее 0,5 мм) было установлено, что на поверхностях трения отсутствуют следы задиров, катастрофического износа, подплавлений и других аномальных процессов. При этом износ работавшего в паре с Маслянитом 12 бронзового вала обнаружен не был.

## Заключение

В результате проведенных исследований триботехнических свойств материалов на основе полиамида в среде имитатора морской воды:

1) выбраны материалы, подлежащие испытаниям;

2) разработана методика испытаний и экспериментальное оборудование;

3) проведены лабораторные испытания выбранных материалов, при этом выявлено, что пара трения бронза БрАМц-9-2 и Маслянит 12 имеют высокие показатели антифрикционных свойств и износостойкости при работе в имитаторе морской воды; износ и коэффициент трения рассмотренной пары трения тем меньше, чем выше класс чистоты металлической поверхности;

4) осуществлена верификация методов лабораторных испытаний в условиях, моделирующих реальные режимы эксплуатации изделия. Установлено, что результаты лабораторных и стендовых испытаний коррелируются между собой и позволяют в дальнейшем применять использованную методику лабораторных испытаний для предварительного отбора оптимальных пар трения, работающих в морской воде;

5) подтверждено, что износ наполненных полиамидных композиционных материалов из группы «маслянит» в рассматриваемых средах после завершения процесса приработки трущихся пар происходит преимущественно по усталостному механизму, чему способствует адсорбируемая на рабочих поверхностях защитная пленка;

6) подобранная и исследованная пара трения может быть использована в различных вариантах («вал-втулка», «скользящие направ-



ляющие» и др.) для подшипников, подпятников, подвижных опор и направляющих строительных, судостроительных, судоремонтных отраслей (портовые и палубные механизмы, технологическое оборудование, плавсредства, скоростные пассажирские суда на подводных крыльях, винтодейдвудные и рулевые устройства, судовые центробежные погружные насосы, оборудование платформ нефтедобычи, ферм по разведению морских рыб, опреснительных станций и др.), которые контактируют с пресной или морской водой.

### Список литературы

1. Бинарные опоры из модифицированных углепластиков для подшипников судовых валопроводов / А.В. Анисимов, В.Е. Бахарева, И.В. Лобынцева, Л.В. Петрова, А.А. Чурикова // Вопросы материаловедения. – 2006. – № 2 (46). – С. 22–26.
2. Бахарева В.Е., Конторовская И.А., Петрова Л.В. Полимеры в судовом машиностроении. – Л.: Судостроение, 1975. – 236 с.
3. Кулик В.П., Хомов С.Н. Испытания графитобаббита откорректированного состава для торцевых уплотнений гребных валов // Вопросы материаловедения. – 2006. – № 2 (46). – С. 181–185.
4. Трение термопластичных углепластиков в воде / И.А. Рашкован, А.П. Краснов, М.Е. Казаков, О.В. Афоничева, О.Б. Кулачинская // Вопросы материаловедения. – 2006. – № 2 (46). – С. 100–104.
5. Основы трибологии (Трение, износ, смазка) / А.В. Чичинадзе, Э.Д. Браун, Н.А. Буше и др.; под общ. ред. А.В. Чичинадзе. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2001. – 664 с. – ISBN 5-217-03053-4.
6. Volynskii A.L., Bakeev N.F. Solvent crazing of polymers. – 1st ed. – Amsterdam: Elsevier, 1995. – 423 p. – ISBN 978-0-444-81848-5.
7. Вольнский А.Л. Эффект Ребиндера в полимерах // Природа. – 2006. – № 11. – С. 11–18.
8. Бартнев Г.М. Прочность и механизм разрушения полимеров. – М.: Химия, 1984. – 280 с.
9. Полимерные композиционные материалы в триботехнике / Ю.К. Машков, З.Н. Овчар, М.Ю. Байбарацкая, О.А. Мамаев. – М.: Недра, 2004. – 262 с.
10. Берштейн В.А. Механогидролитические процессы и прочность твердых тел. – Л.: Наука, 1987. – 318 с.
11. Берштейн В.А., Егорова Л.М., Соловьев В.В. О разрушении полимеров по гидролитическому механизму // Физика твердого тела. – 1977. – Т. 19, № 3. – С. 791–794.
12. Vettegren V.I., Novak I.I., Kulik V.B. Thermal and fluctuation-induced deformations of chemical bonds in surface and boundary layers of polymers // Physics of the Solid State. – 2005. – Vol. 47 (5). – P. 920–926. – DOI: 10.1134/1.1924856.
13. Evaluation of fatigue wear and the nature of the destruction of polymeric materials / D.K.-S. Bataev, Kh.N. Mazhiev, P.U. Goitemirov, M.U. Umarov, M.A. Gaziev // Advances in Engineering Research. – Atlantis Press, 2018. – Vol. 177: Proceedings of the International Symposium on Engineering and Earth Sciences (ISEES 2018). – P. 218–222. – DOI: 10.2991/isees-18.2018.42.
14. Bataev D.K.-S., Goitemirov R.U., Dzhamaldinova M.A. The study of application of maslyanites in pumps designed for pumping aggressive media // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 905. – P. 012007. – DOI: 10.1088/1757-899X/905/1/012007.
15. Самоорганизация и структурное модифицирование в металлополимерных трибосистемах / Ю.К. Машков, О.В. Кропотин, С.В. Шилько, Ю.М. Плескачевский. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2013. – 232 с.
16. Myshkin N.K., Petrokovets M.I., Kovalev A.V. Tribology of polymers: Adhesion, friction, wear, and mass-transfer // Tribology International. – 2005. – Vol. 38, iss. 11–12. – P. 910–921. – DOI: 10.1016/j.triboint.2005.07.016.
17. Kumlutas D., Tavman I.H. A numerical and experimental study on thermal conductivity of particle filled polymer composites // Journal of Thermoplastic Composite Materials. – 2006. – Vol. 19, iss. 4. – P. 441–445. – DOI: 10.1177/0892705706062203.
18. Полимерные композиционные материалы в триботехнике / Ю.К. Машков, З.Н. Овчаров, М.Ю. Байбарацкая, О.А. Мамаев. – М.: Недра, 2004. – 262 с.
19. Полимерные композиционные материалы: свойства, структура, технологии / под общ. ред. А.А. Берлина. – СПб.: Профессия, 2008. – 560 с.
20. Tribological properties of poly(para-phenylene sulfide) and its carbon fiber composites with water lubrication / B.M. Ginzburg, D.G. Tochil'nikov, A.I. Lyashkov, V.L. Ugolkov, V.K. Lavrent'ev, P.A. Shijan, V.P. Ponimatkin // Journal of Macromolecular Science, Part B: Physics. – 2011. – Vol. 50, iss. 6. – P. 1047–1061. – DOI: 10.1080/00222348.2010.497446.
21. Carrying capacity of polymers and polymeric composites in water-lubricated friction against metals / B.M. Ginzburg, D.G. Tochil'nikov, P.A. Shiyan, A.O. Pozdnyakov // Journal of Friction and Wear. – 2011. – Vol. 32. – P. 150–163. – DOI: 10.3103/S1068366611030044.

22. Зуев Ю.С. Разрушение полимеров под действием агрессивных сред. – М.: Химия, 1972. – 232 с.

23. Цветков Ю.Н., Крылов Д.А., Татулян А.А. Соотношение потерь, происходящих на граничный и гидродинамический режим смазки в ДВС // Двигателестроение. – 2010. – № 1. – С. 13–19.

24. Influence of non-smooth surface on tribological properties of glass fiber-epoxy resin composite sliding against stainless steel under natural seawater lubri-

cation / S. Wu, D. Gao, Y. Liang, B. Chen // Chinese Journal of Mechanical Engineering. – 2015. – Vol. 28, N 6. – P. 1171–1176. – DOI: 10.3901/CJME.2015.0928.117.

25. Zhao S., Wang X. The effects of surface texture on the wear properties of mechanical seals made of metal and polymers // Tribology. – 2015. – Vol. 35, N 6. – P. 761–767. – DOI: 10.16078/j.tribology.2015.06.016.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

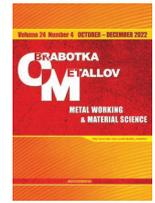
© 2022 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov -

Metal Working and Material Science

Journal homepage: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



## Studies of wear resistance and antifriction properties of metal-polymer pairs operating in a sea water simulator

*Dena Bataev*<sup>1, a, \*</sup>, *Ruslan Goitemirov*<sup>1, 2, b</sup>, *Petimat Bataeva*<sup>1, c</sup>

<sup>1</sup> Kh.I. Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences, 21a Staropromyslovskoe highway, Grozny, 364051, Chechen Republic, Russian Federation

<sup>2</sup> Chechen State Pedagogical University, 33 Subry Kishiyeva St., Grozny, 364037, Chechen Republic, Russian Federation

<sup>a</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-4141-9353>,  [denabataev61@mail.ru](mailto:denabataev61@mail.ru), <sup>b</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-0088-4603>,  [groznyumh@mail.ru](mailto:groznyumh@mail.ru),

<sup>c</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-9628-0742>,  [bataeva\\_gntu@mail.ru](mailto:bataeva_gntu@mail.ru)

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 09 September 2022

Revised: 06 October 2022

Accepted: 25 October 2022

Available online: 15 December 2022

#### Keywords:

Polymeric  
 Composite  
 Maslyanit  
 Wear resistant  
 Coefficient of friction  
 Sea water simulator  
 Fatigue wear

#### Acknowledgements

Research were partially conducted at core facility “Structure, mechanical and physical properties of materials”.

### ABSTRACT

**Introduction.** Sea water is an aggressive environment that causes corrosion, erosion, and cavitation when moving at high speeds of steel, cast iron, bronze, or babbit parts that work satisfactorily only with lubrication. In this case, oil stains are often released into the water, which leads to pollution of the water basin. **Materials and methods.** To study the wear and friction coefficient, the following materials were chosen: pure polyamide *P-610* and antifriction materials based on it *Maslyanit D* and *Maslyanit 12*. The following metals were used as the material of the counterbody: stainless steel *Cr18Ni9Ti*, bronze (9 % *Al*; 2 % *Mn*), and titanium alloy *VT-3*. **Results and discussion.** It is established that the materials of the “*maslyanit*” group have significantly better wear resistance and antifriction properties than pure polyamide *P-610*. It is shown that the reason for such properties of *Maslyanit D* and *Maslyanit 12* is the presence of solid and grease lubricants in its compositions, which simultaneously also play the role of a plasticizer. Finely dispersed metal fillers favorably affect the heat rejection from the friction zone and the growth of the crystalline phase of the polymer. A positive effect of iron minium on the friction of *Maslyanit 12*, which causes the generation of a protective anti-friction film on the working surfaces of the friction pair, is revealed. A decrease in wear and friction coefficient is found as the purity class of the metal surface increased. The predominantly fatigue mechanism of wear of polymeric materials during friction in a sea water simulator is confirmed. The results of testing *Maslyanite 12* in a real marine environment confirmed the positive characteristics of *Maslyanit 12*.

**For citation:** Bataev D.K-S., Goitemirov R.U., Bataeva P.D. Studies of wear resistance and antifriction properties of metal-polymer pairs operating in a sea water simulator. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2022, vol. 24, no. 4, pp. 84–97. DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.4-84-97. (In Russian).

### References

1. Anisimov A.V., Bakhareva V.E., Lobyntseva I.V., Petrova L.V., Churikova A.A. Binarne opory iz modifitsirovannykh ugleplastikov dlya podshipnikov sudovykh valoprovodov [Binary support from modified carbon fiber-reinforced plastics for bearings of ship shaftings]. *Voprosy materialovedeniya*, 2006, no. 2 (46), pp. 22–26. (In Russian).
2. Bakhareva V.E., Kontorovskaya I.A., Petrova L.V. *Polimery v sudovom mashinostroenii* [Polymers in ship engineering]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1975. 236 p.

#### \* Corresponding author

*Bataev Dena Karim-Sultanovich*, D.Sc. (Engineering), Professor, Director  
 Kh.I. Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences,  
 21a Staropromyslovskoe highway,  
 364051, Grozny, Chechen Republic, Russian Federation  
**Tel.:** +7 (871) 222-26-28, **e-mail:** [denabataev61@mail.ru](mailto:denabataev61@mail.ru)

3. Kulik V.P., Khomov S.N. Ispytaniya grafitobabbita otkorrektirovannogo sostava dlya tortsevykh uplotnenii grebnykh valov [Tests of graphite-babbit of corrected composition for end-face seals of propeller shafts]. *Voprosy materialovedeniya*, 2006, no. 2 (46), pp. 181–185. (In Russian).
4. Rushkovan I.A., Krasnov A.P., Kazakov M.E., Afonicheva O.V., Kulachinskaya O.B. Trenie termoplastichnykh ugleplastikov v vode [Friction of carbon fiber filled thermoplastics in water medium]. *Voprosy materialovedeniya*, 2006, no. 2 (46), pp. 100–104. (In Russian).
5. Chichinadze A.V., ed. *Osnovy tribologii (Trenie, iznos, smazka)* [Fundamentals of tribology (Friction, wear, lubrication)]. 2nd ed. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2001. 664 p. ISBN 5-217-03053-4.
6. Volynskii A.L., Bakeev N.F. *Solvent crazing of polymers*. 1st ed. Amsterdam, Elsevier, 1995. 423 p. ISBN 978-0-444-81848-5.
7. Volynskii A.L. Effekt Rebindera v polimerakh [Rebinders effect in polymers]. *Priroda = Nature*, 2006, no. 11, pp. 11–18.
8. Bartenev G.M. *Prochnost' i mekhanizm razrusheniya polimerov* [Strength and possibility of destruction of polymers]. Moscow, Khimiya Publ., 1984. 280 p.
9. Mashkov Yu.K., Ovchar Z.N., Baibaratskaya M.Yu., Mamaev O.A. *Polimernye kompozitsionnye materialy v tribotekhnike* [Polymer composite materials in tribotechnics]. Moscow, Nedra Publ., 2004. 262 p.
10. Bershtein V.A. *Mekhanogidroliticheskie protsessy i prochnost' tverdykh tel* [Mechanohydrolytic processes and strength of strong bodies]. Leningrad, Nauka Publ., 1987. 318 p.
11. Bershtein V.A., Egorova L.M., Solov'ev V.V. O razrushenii polimerov po gidroliticheskomu mekhanizmu [On the destruction of polymers by the hydrolytic mechanism]. *Fizika tverdogo tela = Physics of the Solid State*, 1977, vol. 19, no. 3, pp. 791–794.
12. Vettegren V.I., Novak I.I., Kulik V.B. Thermal and fluctuation-induced deformations of chemical bonds in surface and boundary layers of polymers. *Physics of the Solid State*, 2005, vol. 47 (5), pp. 920–926. DOI: 10.1134/1.1924856.
13. Bataev D.K.-S., Mazhiev Kh.N., Goitemirov P.U., Umarov M.U., Gaziev M.A. Evaluation of fatigue wear and the nature of the destruction of polymeric materials. *Advances in Engineering Research. Atlantis Press, 2018, vol. 177: Proceedings of the International Symposium on Engineering and Earth Sciences (ISEES 2018)*, pp. 218–222. DOI: 10.2991/isees-18.2018.42.
14. Bataev D.K.-S., Goitemirov R.U., Dzhamaaldinova M.A. The study of application of maslyanites in pumps designed for pumping aggressive media. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 905, p. 012007. DOI: 10.1088/1757-899X/905/1/012007.
15. Mashkov Yu.K., Kropotin O.V., Shil'ko S.V., Pleskachevskii Yu.M. *Samoorganizatsiya i strukturnoe modifitsirovanie v metallopolimernykh tribosistemakh* [Self-organization and structural modification in metal-polymer tribosystems]. Omsk, OmSTU Publ., 2013. 232 p.
16. Myshkin N.K., Petrokovets M.I., Kovalev A.V. Tribology of polymers: Adhesion, friction, wear, and mass-transfer. *Tribology International*, 2005, vol. 38, iss. 11–12., pp. 910–921. DOI: 10.1016/j.triboint.2005.07.016.
17. Kumlutas D., Tavman I.H. A numerical and experimental study on thermal conductivity of particle filled polymer composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2006, vol. 19, iss. 4, pp. 441–445. DOI: 10.1177/0892705706062203.
18. Mashkov Yu.K., Ovcharov Z.N., Baibaratskaya M.Yu., Mamaev O.A. *Polimernye kompozitsionnye materialy v tribotekhnike* [Polymeric compound materials in tribotechnique]. Moscow, Nedra Publ., 2004. 262 p.
19. Berlin A.A., ed. *Polimernye kompozitsionnye materialy: svoistva, struktura, tekhnologii* [Polymer composite materials: Properties. Structure. Technology]. St. Petersburg, Professiya Publ., 2008. 560 p.
20. Ginzburg B.M., Tochil'nikov D.G., Lyashkov A.I., Ugolkov V.L., Lavrent'ev V.K., Shijan P.A., Ponimatkin V.P. Tribological properties of poly(para-phenylene sulfide) and its carbon fiber composites with water lubrication. *Journal of Macromolecular Science, Part B: Physics*, 2011, vol. 50, iss. 6, pp. 1047–1061. DOI: 10.1080/00222348.2010.497446.
21. Ginzburg B.M., Tochil'nikov D.G., Shiyan P.A., Pozdnyakov A.O. Carrying capacity of polymers and polymeric composites in water-lubricated friction against metals. *Journal of Friction and Wear*, 2011, vol. 32, pp. 150–163. DOI: 10.3103/S1068366611030044.
22. Zuev Yu.S. *Razrushenie polimerov pod deistviem agressivnykh sred* [Destruction of polymers under the action of aggressive media]. Moscow, Khimiya Publ., 1972. 232 p.

23. Tsvetkov Yu.N., Krylov D.A., Tatulyan A.A. Sootnoshenie poter', prikhodyashchikhsya na granichniy i gidrodinamicheskii rezhim smazki v DVS [Comparison of friction losses in hydrodynamic and interfacial regimes of lubrication in internal combustion engines]. *Dvigatelayestroyeniye*, 2010, no. 1, pp. 13–19. (In Russian).

24. Wu S., Gao D., Liang Y., Chen B. Influence of non-smooth surface on tribological properties of glass fiber-epoxy resin composite sliding against stainless steel under natural seawater lubrication. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2015, vol. 28, no. 6, pp. 1171–1176. DOI: 10.3901/CJME.2015.0928.117.

25. Zhao S., Wang X. The effects of surface texture on the wear properties of mechanical seals made of metal and polymers. *Tribology*, 2015, vol. 35, no. 6, pp. 761–767. DOI: 10.16078/j.tribology.2015.06.016.

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2022 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).